

T H E S E

PRÉSENTÉE

A LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS VII

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Tovy GRJEBINE

**CONTRIBUTION A L'ETUDE
DES APPORTS DE POUSSIERE COSMIQUE SUR LA TERRE**

Soutenue le 5 février 1971, devant la Commission d'Examen

MM. E. SCHATZMAN Président

G. LAMBERT Rapporteur

J.C. PECKER

F. LINK Examineurs

J. LABEYRIE

T H E S E

PRESENTEE

A LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS VII

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Tovy GRJEBINE

**CONTRIBUTION A L'ETUDE
DES APPORTS DE POUSSIERE COSMIQUE SUR LA TERRE**

Soutenue le 5 février 1971, devant la Commission d'Examen

MM. E. SCHATZMAN	Président
G. LAMBERT	Rapporteur
J.C. PECKER	
F. LINK	Examineurs
J. LABEYRIE	



TABLE DES MATIERES

	Pages
Chapitre 1 - INTRODUCTION	7
Chapitre 2 - HISTORIQUE	9
Chapitre 3 - LES MANIERES D'ABORDER LE PROBLEME	13
Chapitre 4 - LES COLLECTIONS AU SOL	15
Chapitre 5 - LES PRELEVEMENTS EN ALTITUDE	45
Chapitre 6 - COLLECTIONS DE RETOMBEES DANS L'ANTARCTIQUE	57
Chapitre 7 - RETOMBEE COSMIQUE DANS LES OCEANS	71
Chapitre 8 - DETERMINATION DE LA MASSE ACCRETEE PAR LA TERRE PAR L'ANALYSE CHIMIQUE DES SEDIMENTS OCEANQUES	97
Chapitre 9 - EVALUATIONS POSSIBLES DES MASSES ACCRETEES PAR LA TERRE PAR LE FLUX DETECTE DANS L'ESPACE. LA RADIOACTIVITE OU LES QUANTITES D'ENERGIE APPORTEES A LA TERRE	125
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	131
BIBLIOGRAPHIE	139



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556001_0008

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail je voudrais remercier le Professeur E. SCHATZMAN qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le Jury de cette thèse.

Les Professeurs J.P. PECKER, J. LABEYRIE, F. LINK, G. LAMBERT ont bien voulu faire partie de ce Jury, qu'ils trouvent ici nos remerciements.

Le Professeur C. HENEMWAY, en tant que spécialiste international de poussière cosmique a bien voulu assister ce Jury par un rapport écrit, qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

J. LABEYRIE a assuré la direction de ce travail qui a été réalisé dans son laboratoire du S.E.P. à Saclay d'abord, du C.F.R. à Gif ensuite. Cette direction a toujours été intéressante et vivante. Dans un sujet qui se prêtait peut-être peu à une recherche méthodique comme celle d'une thèse, il a cherché à de nombreuses reprises à m'aider à circonscrire ce travail autour de quelques points qui lui paraissaient fondamentaux. Une direction scientifique ne se juge pas seulement au rapport et conseils personnels que l'on reçoit mais par le recrutement et l'ensemble de l'état d'esprit qui s'installe dans un laboratoire.

Le Centre des Faibles Radioactivité est un lieu stimulant où souffle un véritable désir de recherche et l'ensemble des chercheurs qui s'y trouve ne devrait pas trouver ici des remerciements de ma part, mais recevoir la part qui leur revient. Ainsi dans l'ordre des problèmes soulevés dans cette thèse :

- Claude LALOU a entièrement revu le manuscrit de cette thèse et a participé à l'étude des sphérules extraites des sédiments.

- Gérard LAMBERT et J. LABEYRIE ont participé aux études sur les retombées.

- Jeannette MARTIN, Marie-Claude CHENEUX, Bénédicte ARDOUIN ont effectué la plupart des mesures.

Les expériences de collection statosphériques ont été la poursuite de la collaboration avec l'équipe de G. LAMBERT avec la collaboration de Huang CHI TRAH et B. DAVID.

- Les échantillons de glace polaire nous ont été procuré par Claude LORIS.

- Guy RICOU a participé à la quasi totalité des études faites sur les poussières extraites des glaces ainsi que Marie-Claude CHENEUX, Lydie CHENOUEAU et Marie-José HARTMAN.

Les équipes organisées par les T.A.A.F.S. ont fait en Terre Adélie des prélèvements d'air et de précipitations ainsi MM. POLIAN, PELLICIER, BOUVET, JACQUIN, LEMARIE, JACQUIN (II), BERGERAT ont collaboré à ce travail.

Les carottes des sédiments Méditerranéen ont été prélevées par J. ROS qui a collaboré à leur étude avec Claude LALOU.

La carotte de sédiments de l'Océan Indien nous a été fournie par le Lamont Geological Observatory.

Le Lac Léman a été étudié en collaboration avec Mme Colette SERRUYA.

Le Laboratoire du ^{14}C du C.F.R., dirigé par Mme DELIBRIAS a fait les datations des carottes.

L'étude des retombées dans les Océans a été faite en collaboration avec Y. YOKOYAMA, J. TOBAILEM, Pierre BRISTEAU et PHILIPPOT. R. CHESSELET, Jacques MARTIN, Patrick BUAT-MENARD nous ont aidé à suivre la bibliographie dans cette spécialité.

L'étude de la radioactivité d'origine cosmique a eu dans la pratique un développement expérimental beaucoup plus important que ne le laisse penser ce travail ainsi avec la collaboration de Georges POLIAN des installations très importantes ont été organisées à l'Aiguille du Midi, les collections de poussières en altitude ont été ensuite reprises par D. NORDEMANN.

Une collaboration efficace a existé également avec les autres services du C.E.A.

Josiane CITTANOVA, Marie-Edith RAPERT ont effectué les mesures de spectrométrie optique. GUILLERMAUX les mesures de spectrométrie X.

Mathieu CAPITANT et son équipe du B.R.G.M. ont effectué les mesures à la microsonde électronique.

J. LAPORTE nous a aidé à effectuer les mesures au microscope électronique de plaquettes exposées à l'impact de micrométéorites à 100 kilomètres d'altitude à l'aide de fusée tirée par l'AFRCL, dirigé par Robert SOBERMAN et d'un autre tir effectué par la NASA dans une expérience organisée par Neal FARLOW.

Enfin, le Secrétariat du C.F.R. ainsi que les Ateliers du C.N.R.S. à Gif ont prêté un concours rapide et efficace.

Que l'ensemble de ces travailleurs trouve ici nos remerciements pour leur collaboration.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES APPORTS DE POUSSIERE COSMIQUE SUR LA TERRE

Chapitre 1

INTRODUCTION

Le développement des fusées dans l'après guerre, suivi du lancement du premier satellite en 1959, a marqué le début d'une ère d'exploration de l'espace et a permis d'introduire dans ce domaine des techniques qui jusqu'à présent étaient réservées à l'étude de la matière terrestre.

La première exploration de la Lune en 1969 ouvre une nouvelle étape pour l'étude de la matière extérieure à la Terre, où les techniques physiques chimiques, géologiques pourront être appliquées non plus sur quelques fragments dont l'authenticité cosmique n'est pas toujours certaine, mais sur des échantillons volumineux qui faciliteront considérablement les études.

L'ensemble de ce travail date de l'époque "avant Lune". Seuls quelques résultats publiés après les premières analyses de roche lunaire sont venus compléter les comparaisons effectuées entre la poussière présumée cosmique et les roches terrestres ou les météorites.

Dans toute étude il est bon de faire le point avant de tourner une page et de commencer les études sur de nouveaux échantillons, de confronter les résultats obtenus avec les nouvelles observations, de déterminer si les résultats obtenus sont désormais caducs ou au contraire si malgré l'arrivée d'échantillons plus volumineux l'étude de la matière très fragmentée s'impose toujours.

La matière fragmentée, la poussière, constituent une partie importante de l'univers. Les poussières présentes dans la galaxie, même quand elles ne sont pas regroupées en nuages se manifestent par leur action sur la lumière. L'action sur la lumière est probablement aussi la principale manifestation de la poussière présente dans le système solaire Lumière Zodiacal, Comète, météore.

Jusqu'à maintenant les traces de cette matière même quand ses effets sont perçus dans l'atmosphère sous l'aspect "d'étoiles filantes" ne sont pas indubitablement identifiées, pourtant cette matière doit bien être présente et arriver jusqu'au sol.

C'est un peu dans ce contexte que s'est déroulé ce travail. Il s'agissait de peser, de trouver quelque chose qui par son abondance, sa forme, ou ses associations

ne semblait pas devoir être attribué à la Terre.

Le problème de la poussière cosmique débouche sur de nombreux problèmes de géophysique spatiale, que ce soient des problèmes actuels, ou des problèmes liés à l'histoire du système solaire. Nous ne savons pas encore combien d'informations nous parviendront de son étude, mais il est indéniable que l'on pénètre avec son étude comme avec l'étude du sol lunaire dans un nouveau chapitre de l'astronomie et de la géophysique.

C'est pourquoi, J. LABEYRIE nous a demandé de commencer à étudier ce problème et notamment de chercher les différentes méthodes pour évaluer la masse totale de poussière qui pouvait tomber sur la Terre.

Cependant, il faut remarquer que, actuellement nous ne connaissons pas l'ensemble des caractéristiques de la poussière cosmique. Il ne peut donc être question de la mesurer directement.

Nous allons donc au cours de ce travail examiner les différentes méthodes possibles pour la détermination de la masse de matière cosmique accrétée par la Terre. De voir si ces différentes voies conduisent à un chiffre unique, ou si au contraire, nous sommes obligés d'admettre que le choix des méthodes amène à des quantités différentes qui reflètent les diverses conceptions, et les hypothèses que l'on fait sur la poussière cosmique.

Nous savions déjà que les déterminations de la masse accrétée faites par différents auteurs varient de 10 à 10^9 tonnes/terre an. Il s'agit donc de comprendre si ces différences provenaient des modes opératoires des différents auteurs ou si c'est bien les méthodes elles-mêmes qui aboutissaient à des chiffres différents parcequ'elles ne mesuraient pas la même chose.

Il était prévu en dehors des méthodes qui sont décrites dans les chapitres qui suivent de tenter une détermination avec la méthode des cosmonuclides radio-actifs formés dans la poussière par le rayonnement cosmique, mais des collections suffisamment massives n'ont pu être réalisées, nous nous bornons donc pour cette partie à un examen bibliographique du sujet. Il en est de même des collections dans l'espace libre, les deux tirs de fusées auxquels nous avons participé ayant eu des incidents.

Chapitre 2

HISTORIQUE

Le monde extérieur n'a d'importance pour nous que pour autant que nous le rencontrons sur notre route. Mais son acceptation ne va de pair qu'avec sa domination, en effet, toute autre acceptation d'un monde extérieur non dominé ne peut être qu'un sujet d'inquiétude, voire de trouble. Ainsi, malgré des observations finalement nombreuses, les météorites n'ont été acceptées comme corps célestes que dans le cadre de mythe religieux. Les pierres sont vénérées, l'Eglise les utilise pour le culte. Le développement de la pensée rationnelle, non religieuse, remet en doute l'origine des pierres célestes avec les mythes et cérémonies qui les accompagnent.

Au XVII^{ème} Siècle, quand se développe la pensée scientifique, les météorites posent un problème. Leur acceptation comme corps céleste doit être compatible avec les autres constatations scientifiques. La rigueur de la science naissante est grande, aussi il ne faut pas s'étonner de voir un minéralogiste suisse, J.A. DELUC, écrire que, même s'il avait été personnellement témoin d'une chute de météorite, il n'en aurait pas cru ses yeux et, en effet, les explications qui sont proposées plus tard par LAVOISIER de pierres formées sous l'impact de la foudre, sont beaucoup plus plausibles, beaucoup plus scientifiques, beaucoup plus vraies, dans la mesure où l'inventaire d'observations de la constitution de ces pierres et de leurs chutes était à peine commencé. Ce n'est donc que lorsque cet inventaire se complète que les précédentes explications cèdent finalement le pas à une acceptation d'origine céleste. Mais la position des scientifiques, comme LAVOISIER, DELUC, BERTHOLLET, nous semble extrêmement louable.

Dans la mesure où l'observation n'était ni un métier, ni un fait organisé, où les informations les plus extraordinaires circulaient de bouche à oreille, il n'y avait aucune raison de ne pas faire d'abord appel à des explications rationnelles, conformes à l'inventaire d'observations vérifiées existant alors. Ce ne sera donc que lorsque l'étude des météorites sera entreprise (CHLADMI, 1794 [V.K.] et HOWARD, 1802 [V.K.]) et que lorsque des observations méthodiques seront faites, que l'Académie des Sciences, après une enquête menée par l'Académicien BIOT [V.K.] sur la chute météoritique du "village de l'Aigle", en 1803, accepte l'origine extra-terrestre.

A la même époque, des études intensives sont menées en Russie. Après les travaux de CHLADMI [V.K.] sur la météorite de Pallas, conservée dans la galerie d'art de Saint-Petersbourg, LOVIT, en 1804, publie des études chimiques [V.K.] et finalement paraît le mémoire intitulé "Des pierres aériennes et leur origine" d'un

physicien de Kharkov, A. STOIKOVICH [V.K.]. Dans tous les pays, on est passé du mythe à la négation, puis à l'acceptation d'une idée nouvelle, à mesure que de nouvelles observations étaient effectuées.

L'histoire de l'attitude des scientifiques vis-à-vis des météorites est extrêmement intéressante. L'étude de la poussière cosmique, bien que venant un siècle plus tard, est passée par les mêmes hauts et bas.

Les premières observations de sphérules sont faites par un géologue explorateur suédois, A.E. NORDENSKJOLD, qui, en 1874, les découvre dans la neige (1874). A peine un an après, G. TISSANDIER seul (1875), puis avec S. MEUNIER, les retrouve en France (1878). S. MEUNIER continua ensuite seul le travail (1903). En trois publications, ces chercheurs ont presque épuisé la question, et en un siècle, nous ne sommes pas allés beaucoup plus loin. Ces auteurs, après avoir détecté des sphérules magnétiques dans les retombées de poussières ont montré que ces sphérules ne pouvaient pas être industrielles parce qu'ils les retrouvaient dans plusieurs sédiments anciens, ils excluaient de même une origine volcanique à partir d'une deuxième observation : on retrouvait ces sphérules dans la neige, notamment en Islande, à des périodes où il n'y avait aucune éruption volcanique.

C'est d'une manière parfaitement indépendante que Sir John MURRAY (1876) redécouvrait les sphérules cosmiques dans les boues rouges du fond de l'Océan Pacifique en 1876.

En 1830, L. RUDEAU (1927), observe une retombée de sphérules après le passage d'un bolide ; c'était la première corrélation observée avec les "Météores". Après la guerre, les travaux de MURRAY furent repris par un océanographe suédois, Hans PETTERSON (1947).

Explorant systématiquement les niveaux des différentes "carottes" de fond océanique, Hans PETTERSON montre les variations du nombre de sphérules, et il lance l'idée qu'une partie des sédiments marins serait cosmique car il pense que la teneur en nickel en est anormalement forte. Cette association du nickel avec l'extra-terrestre a pour origine la forte teneur en nickel des météorites de fer, environ 10 %. On croit par là, tenir le moyen de différencier le terrestre du cosmique, car à la surface de la Terre, le nickel est rare, moins de 1 % par rapport au fer. La poussière sphérique, métallique, est donc assimilée aux seuls corps célestes que nous connaissons : les météorites.

Cette association va dominer les recherches, et comme toute hypothèse élaborée un peu trop tôt, les freiner considérablement. Nous venons à peine d'en être délivrés.

Après la guerre, les travaux de PETTERSON ébranlent pas mal d'imaginaires, d'autres expéditions océanographiques comme celles de la Galathée et de l'Albatross s'y intéressent (1947) (1955). Plusieurs chercheurs américains commenceront l'étude des poussières dans les retombées, mais on n'y trouve plus le nickel, à la place des 10 % on n'en retrouve que quelques traces. Cependant, PETTERSON lui-même, et d'autres chercheurs suédois qui travaillent avec lui, rejettent impitoyablement les sphérules non nickelifères et les attribuent à l'industrie ou au volcanisme.

[[V.K.]= voir le livre de E.L. Krinov "Principles of Meteoritics" Pergamon Press, 1960.

Plusieurs chercheurs américains abandonnent leurs recherches lorsqu'ils constatent que la poussière sélectionnée, (les sphérules), ne contient pas de nickel au même taux que les météorites de fer. Personne ne semble se préoccuper du fait que si cette poussière provenait de l'industrie, celle-ci devrait avoir une extension extraordinaire, ou que si elle provenait de l'ablation des météorites, nous devrions être littéralement bombardés par les morceaux les plus gros de ces météorites. A la place de la vingtaine de météorites qui tombent par jour sur la Terre, ce serait des milliers qui devraient labourer nos champs et crever les toits de nos maisons.

L'aspect dominant de toutes ces premières études est leur aspect de science de prospection. L'impossibilité de s'affranchir de toute contamination terrestre pour chercher une composante dont les caractéristiques spécifiques sont inconnues a conduit à un gaspillage considérable d'efforts.

Quand les études en fusée commencent, paradoxalement, le même sort leur est dévolu. En effet, on ne savait simuler les conditions spatiales que très imparfaitement, et, la plupart du temps, les détecteurs étaient étalonnés dans des conditions très différentes de leur emploi. Aussi, des reproches, parfois justifiés, ont été adressés à ces expériences.

Les expériences spatiales les plus récentes vont marquer une nouvelle étape dans cette étude. Par exemple, de grands satellites comme Pégase ont accumulé de grandes quantités de données, en effet, l'emploi de satellites habités avec des pièges à poussières cosmiques, sous le contrôle des astronautes supprimera de plus en plus les aléas des capteurs mécaniques non contrôlés. Par ailleurs, l'étude de la Lune, le dépôt sur la Lune d'appareils enregistreurs qui vont constituer enfin de véritables laboratoires en dehors de l'atmosphère vont permettre de déterminer non seulement le flux et l'origine de ces poussières, mais encore permettront son analyse complète, des quantités suffisantes de poussière pouvant, dans ces conditions, être ramenées. Ainsi le lien sera établi entre la constitution de la matière disponible dans les zones parcourues par la Terre et son origine. Cette information est primordiale pour comprendre, au-delà des phénomènes ayant actuellement cours, ceux qui, par le passé, ont donné naissance aux planètes elles-mêmes.

Chapitre 3

LES MANIERES D'ABORDER LE PROBLEME

Une étude de la poussière cosmique pouvait être orientée de diverses manières. Une approche logique du problème aurait voulu que cette étude commence par l'étude des caractéristiques de cette poussière, puis, ces caractéristiques connues, on aurait pu passer à l'étude des quantités qui retombent sur la Terre, et enfin, on aurait pu étudier les effets qu'elle produit. Mais les voies logiques ne sont pas toujours celles qui sont suivies ni même parfois celles qu'il est possible de suivre.

Dans le cas des poussières cosmiques, la nécessité de répondre à des questions fondamentales a fait que, pratiquement, cette étude a été orientée dès l'origine, vers la détermination de la quantité totale de poussière arrivant sur Terre, plutôt que vers l'étude de ses caractéristiques. En fait, cette quantité est aussi une des principales caractéristiques de la poussière. Elle permet de déterminer si l'on a à faire simplement à une curiosité de la nature ou bien si ce phénomène naturel a une importance réelle, aussi bien pour la compréhension des phénomènes géophysiques actuels que pour la connaissance du passé.

Il existe plusieurs procédés pour tenter de déterminer cette quantité de poussière arrivant sur la Terre. Le présent travail a pour but de confronter ces différentes méthodes et leurs hypothèses de base.

La masse totale de poussières collectées par la Terre peut être mesurée directement ou indirectement.

La détermination directe peut se faire de diverses façons :

1° - par des mesures dans des collecteurs disposés en différents points du Globe, donc évitant ainsi des conditions météorologiques particulières. Il est alors nécessaire d'éliminer les poussières dues à une pollution locale.;

2° - par des mesures globales dans un collecteur placé dans une région particulièrement choisie ;

3° - par des mesures de la quantité de poussières qu'on peut récolter dans un milieu naturel, en principe non pollué, comme la neige polaire ;

4° - par des mesures dans un autre milieu naturel comme l'Océan, il est alors nécessaire de faire une hypothèse, soit sur la composition chimique, soit sur les caractéristiques morphologiques de cette poussière afin de pouvoir la différencier du milieu ;

5° - en mesurant, au sol ou en altitude, la concentration de poussière et la radioactivité artificielle due aux débris d'explosions nucléaires. On établit alors

un rapport entre la quantité de débris radioactifs et la quantité de poussières, il suffira donc ensuite de mesurer la quantité de débris radioactifs récoltés sur Terre pour avoir le poids total de poussière. Cette méthode nécessite d'émettre l'hypothèse que les deux sortes de poussière suivent les mêmes lois météorologiques;

6° - la même méthode peut être employée en utilisant, au lieu des corps radioactifs artificiels, les corps radioactifs naturels tels que ceux produits par le rayonnement cosmique ;

7° - si l'on affecte, par hypothèse, une certaine composition chimique à la poussière cosmique, on peut, même dans une collection douteuse, déterminer la part d'origine cosmique et la part d'origine terrestre. Cette méthode peut être appliquée :

- . sur des collections de retombées au sol,
- . sur des mesures de concentrations par unité de volume, cette valeur étant ensuite transformée en quantité de retombée au sol par la détermination du temps de chute ou par l'utilisation des produits radioactifs des bombes atomiques. Dans ce cas, la méthode est très voisine de celle décrite au paragraphe 5 ; mais les mesures peuvent être parfaitement indépendantes.

Deux méthodes indirectes peuvent être envisagées :

8° - la masse totale de poussière collectée par la Terre peut avoir différentes origines. Dans l'hypothèse d'une origine sans mouvement angulaire, la masse totale collectée aura pour effet un ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre. Cette méthode permet de fixer des limites à la quantité de poussière arrivant sur la Terre ;

9° - une comparaison entre la poussière collectable sur la Terre et la poussière observable sur d'autres planètes, la Lune par exemple, fournit également une voie d'approche pour estimer le flux de poussières et l'origine de ces poussières.

Bien qu'incomplète, l'énumération des différentes possibilités de mesure de la quantité de poussière nous montre que l'ensemble des valeurs ainsi obtenues devrait nous permettre de délimiter une zone probable de cette grandeur.

Nous comparerons ensuite les résultats donnés par les différentes méthodes en essayant de préciser, en cas de divergences, si celles-ci sont dues aux hypothèses ou aux méthodes elles-mêmes.

Chapitre 4

LES COLLECTIONS AU SOL

I - LES TECHNIQUES

a) - Techniques de prélèvement

- Aspiration à travers un filtre

Un grand nombre de prélèvements ont été effectués par filtration, soit filtration statique par pesanteur, soit par aspiration d'air.

Il ne semble pas utile de s'étendre ici sur la théorie de la filtration, sur les rendements que l'on obtient en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air sur le filtre ou sur la taille des poussières collectées, des ouvrages existent qui développent ces divers points de façon très détaillée.

Nous verrons que, sur un collecteur statique, la quantité de poussière qui tombe par jour est égale à la quantité de poussière contenue dans une colonne de même surface et d'environ 1,8 km de hauteur, ce qui correspondrait à une aspiration de $75 \text{ m}^3/\text{heure}$ pour une surface de collection de un mètre carré. Un collecteur dont la section d'aspiration serait tournée vers le haut et qui aspirerait l'air à une vitesse inférieure à celle du vent, collecterait donc, d'une part, la quantité de poussière correspondant à la quantité d'air ainsi aspiré, mais aussi la quantité de poussière comprise dans cette colonne d'air, soit $75 \text{ m}^3/\text{heure}$ en supplément. Il aurait donc un rendement supérieur à 1.

Des collecteurs par aspiration à section variable, adaptés à la vitesse du vent n'ont encore jamais été réalisés, il est donc très difficile d'éviter les facteurs d'incertitudes dus à l'orientation de la surface filtrante par rapport à la direction du vent.

- Collecteurs statiques

Les collecteurs statiques sur lesquels les poussières sont collectées par simple gravité, présentent des anomalies de rendement encore plus grandes. Si l'on recueille les retombées radioactives contenues dans la pluie au moyen d'un collecteur en forme d'entonnoir ou d'un collecteur en forme de cylindre, on obtient des variations de 10 % environ.

Le réseau de collection de retombées radioactives géré par le C.F.R. emploie un collecteur statique en plexiglass ayant une ouverture de $1/10$ de m^2 recouverte d'une gaze chirurgicale tendue : le CRAPAL. Dans une étude sur les retombées radioactives, G. LAMBERT (1963) signale qu'il a obtenu jusqu'à 4 fois plus de radioactivité avec un CRAPAL dont la surface de collection, au lieu d'être horizontal, était

verticale. Par contre, si l'on remplace la gaze chirurgicale qui est la surface de collection du CRAPAL, par de l'eau, on ne collecte plus que 52 % de la radioactivité.

En général, pour les retombées radioactives, on a supposé que le rendement de collection du CRAPAL était 1 car son rendement était assez voisin de celui des collecteurs utilisés dans les autres pays, notamment ceux de U.S.-AEC, ces collecteurs ayant été contrôlés par des mesures faites en milieu naturel, par exemple par mètre carré de sol. Cette normalisation du rendement des collecteurs par comparaison avec une surface naturelle qui pourrait amener à la construction d'un collecteur statique idéal, ne peut se faire pour les poussières car il n'est pas possible, lorsqu'elles ont atteint le sol, de les en distinguer. On en est donc réduit à utiliser des collecteurs qui sont représentatifs pour les produits radioactifs, tout en sachant qu'il ne sera possible de vérifier ce rendement pour les poussières cosmiques que lorsqu'on aura pu préciser les caractéristiques de celles-ci afin de pouvoir les différencier sur le sol même.

b) - Techniques d'études en laboratoire

- Pesée directe

Quant l'échantillon récolté se présente sans aucun support tel que filtre ou gaze, la pesée directe peut être employée. Malheureusement, ceci ne peut être réalisé que dans très peu de cas, entre autres dans le cas d'évaporation de neige. La plupart du temps, il est nécessaire de se débarrasser préalablement du support de l'échantillon. Le procédé couramment utilisé est la calcination de l'échantillon. Il faut toutefois noter que cette calcination élimine toute la matière organique, et il n'y a aucune raison de penser que les apports cosmiques se limitent à des apports de matière minérale puisqu'en fait il existe des météorites contenant des proportions importantes de matières voisines des matières terrestres. Néanmoins, dans la majorité des cas, il est impossible d'éviter la calcination. Celle-ci introduit des pertes, mais en revanche permet de se débarrasser facilement des contaminations biologiques terrestres, notamment de celles dues aux pollens dont les possibilités de parcours dans l'air sont considérables.

Par ailleurs, les filtres ou autres milieux de prélèvement ne sont pas toujours calcinables sans cendres. Aussi, dans certains cas, nous avons utilisé des filtres pesés avant et après le prélèvement, mais cette méthode n'est valable que si le poids de poussière collectée est important par rapport au poids du filtre. En effet, différents facteurs peuvent avoir une influence sur le poids du filtre avant et après le prélèvement : variations hygrométriques, évaporation rapide du solvant dans le cas, par exemple, de l'utilisation de filtres organiques du type "Microsorban".

De toute façon, la pesée directe nécessite des collections importantes ce qui n'est pas toujours possible, c'est pourquoi nous avons utilisé une autre méthode de mesure, beaucoup plus sensible : la pesée magnétique.

- Pesée magnétique

Cette méthode, beaucoup plus sensible que la précédente, permet en outre d'éviter la destruction des échantillons.

Nous ne donnerons pas ici une description du principe de cette méthode qui

est très connu. Cependant, nous n'avons pas utilisé cette méthode de façon classique; en effet, en général, ces balances sont utilisées pour déterminer la susceptibilité magnétique d'un échantillon dont le poids est connu (G. GRENET, 1930). Dans notre étude nous avons, au contraire, supposé une susceptibilité magnétique moyenne des poussières, constante, cette valeur étant déterminée sur différents échantillons collectés au cours de la même campagne, et à partir de nos pesées magnétiques et de cette valeur moyenne, nous avons déterminé le poids de l'échantillon. Nous reviendrons un peu plus loin sur cet étalonnage.

Par conséquent, tant que la susceptibilité magnétique réelle de la poussière n'a pas été mesurée, nous mesurons simplement une attraction magnétique qui peut être exprimée en dynes ou plus simplement, en attraction équivalente, c'est-à-dire par comparaison avec l'attraction que subit, dans les mêmes conditions de pesée, une certaine quantité de matière magnétique.

Nous avons beaucoup utilisé comme équivalent deux matières magnétiques :

. l'oxyde de fer $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ de susceptibilité 50.10^{-6} uem et

. l'oxyde de fer $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ de susceptibilité $13\ 200.10^{-6}$ uem,

les deux étalons ayant été mesurés sur l'installation de G. GRENET à l'Institut de Physique du Globe.

Nous ne donnerons pas ici les principales références des travaux sur le magnétisme des roches et des minéraux pas plus que des explications théoriques sur ce magnétisme, cette étude au sol des retombées s'étant simplement fixée comme but l'étude des corrélations entre les retombées magnétiques, les autres retombées ou les phénomènes météorologiques.

Par cette méthode, des mesures rapides peuvent être effectuées sur des quantités de poussières supérieures à 10^{-5} grammes de susceptibilité magnétique du même ordre que celle du $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ soit $13\ 200.10^{-6}$ uem.

En général, la susceptibilité magnétique de la poussière s'est montrée inférieure à cette valeur, ce qui ne nous a permis de mesurer que des échantillons dont la masse était supérieure à 10^{-4} grammes, ces échantillons étant mesurés sans être séparés du filtre sur lequel ils avaient été collectés.

Ces mesures magnétiques sont beaucoup plus rapides que toute autre méthode ; elles permettent ainsi de suivre les variations rapides des quantités de poussières collectées, rendant ainsi possible des mesures jour par jour ou mois par mois ou bien des mesures de variations de la teneur en poussière de faibles quantités de neige.

Cependant, pour utiliser cette méthode, il faut, comme nous l'avons vu précédemment, faire une mesure de la susceptibilité réelle moyenne de la poussière pour permettre la conversion de cette valeur en poids réel de poussière. Nous avons fait cette mesure sur des quantités connues de poussière, soit en regroupant l'ensemble des échantillons d'une même série de mesure et en détruisant les filtres avec des précautions telles que les caractéristiques de l'échantillon soient aussi peu altérées que possible, soit en utilisant un seul échantillon type, spécialement choisi comme représentatif de la poussière. La valeur ainsi obtenue nous a permis de passer de la mesure de susceptibilité magnétique de chaque échantillon à sa masse.

Dans le cas des collecteurs statiques : CRAPAL, où la collection se fait sur une gaze, la poussière collectée est calcinée en même temps que la gaze. On a pu observer expérimentalement que la calcination diminuait le magnétisme d'environ

10 %. Cette calcination pouvait par ailleurs présenter un avantage car tous les échantillons se présentaient, après traitement, dans le même degré d'oxydation. La calcination agissait ainsi comme un normalisateur.

Cette méthode est évidemment critiquable, mais elle permet de tenir compte de données inutilisables par les autres méthodes. Entre autres, elle a permis de réunir des renseignements sur l'ensemble du Globe sans nécessiter un réseau de collecteur spécialement installé à cet effet.

Nous avons utilisé quatre types de balances magnétiques dont les trois premiers ont été construits par nous :

Deux balances à deux plateaux pour lesquelles le champ et le gradient de champ sont créés respectivement par un aimant permanent et un électro-aimant.

Une balance de torsion, la pesée se faisant par "arrachement" dans un champ à fort gradient créé par un barreau aimanté.

La balance magnétique à torsion de CURIE dont il a été question plus haut.

c) - Séparation des poussières et granulométrie

La séparation des poussières de même dimension a été faite, soit par tamisage sur des micro-tamis, soit par séparation sous le microscope.

- Extraction

Les extractions de poussières magnétiques ont été effectuées par des méthodes mécaniques et par l'utilisation d'un extracteur magnétique qui a été fabriqué spécialement au laboratoire pour extraire les poussières dans les sédiments.

- Etude minéralogique

Les études de densité, de susceptibilité magnétique par catégories de densité, ainsi que les mesures de diffraction aux rayons X n'ont pas été incluses dans ce travail.

- Mesure de la radioactivité

La radioactivité de tous les échantillons a été mesurée. Ces mesures portaient sur la radioactivité qui était associée à ces poussières à cause des débris atmosphériques des bombes atomiques. Cette étude permettait de déduire des informations supplémentaires sur le séjour stratosphérique des poussières.

Les mesures de radioactivité bêta globale ont été effectuées sur une installation standard, sans modifications spéciales, mais il n'en a pas été de même pour les mesures d'activité gamma. Une partie de ces mesures a été faite au laboratoire de Radioactivité Atmosphérique du D.H.A. du C.E.A. que dirige M. PHILLIPOT, une autre partie au Centre des Faibles Radioactivités dans une installation dont les blindages ont été considérablement augmentés.

- Analyses chimiques

Les analyses chimiques ont été, dans la majeure partie des cas, effectuées à la microsonde électronique, ou plus rarement par spectroscopie optique.

Pour quelques échantillons de masse importante, on a essayé d'utiliser les méthodes chimiques classiques. Toutefois, l'attaque de ces poussières pour la mise en solution est très difficile.

Hoang CHI TRACH a procédé à des dosages de fer dans les retombées collectées à Toulouse, la station de Toulouse ayant été choisie parce qu'elle présentait des

quantités de poussières relativement faibles par rapport aux autres stations du réseau, ceci permettait de supposer que la pollution éolienne ou industrielle était minimale. Parallèlement on a effectué des mesures magnétiques. Le tableau 1 et la courbe de la figure 1 donnent ces résultats pendant quatre ans. On constate un bon accord entre les deux méthodes pour les deux premières années, avec toutefois des maximums beaucoup plus prononcés pour la méthode magnétique que pour la méthode chimique, pour les deux dernières années cet accord disparaît mais les ordres de grandeur restent néanmoins concordants.

En valeur absolue, à 15,1 mg de fer par mètre carré par mois correspond un magnétisme équivalent à 18,4 mg de $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ ce qui montre que le fer ainsi collecté est très magnétique. Il faut noter qu'une mesure de magnétisme de fer $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ après calcination a montré que ce traitement n'affectait pas son magnétisme, on est donc en présence d'une retombée très magnétique.

Tableau 1

RETOMBEE DE FER A TOULOUSE

D.C. : dosage chimique - M.M. mesures magnétiques.

	1961		1962		1963		1964		1965		1966	
	D.C.	M.M.	D.C.	M.M.	D.C.	M.M.	D.C.	M.M.	D.C.	M.M.	D.C.	M.M.
Janvier			12,9	18,7	10,8	28,8	12,6	13,0	22,8	28	13,4	13
Février			10,2	16,0	9,6	1,7	10,3	10,0	13,2	14,8	14,9	
Mars			15,3	16,0	34,8	35,0	7,9	21,0	14,4	14,8	10,1	
Avril			20,7	14,0	15,8	35,6	11,0	12,0	14,4	15,6	9,9	
Mai			37,9	41,0	10,3	12,4	13,2	12,4	9,6	11,6	14,9	
Juin			9,9	6,2	6,6	11,0	8,0	18,0	12,3	15,6	13,2	12
Juillet	13,4	12,0	20,0	14,6	11,7	18,0	18,0	38,0	26,7	22,8	16,5	22
Août	10,8	4,7	19,6	32,9	4,8	5,0	33,3	48,0	14,8	11,6	16,4	19
Septembre	16,0	10,0	18,3	17,1	12,8	14,0	9,6	11,0	22,8	21,2	15,3	24
Octobre	13,0	7,2	14,4	24,3	11,5	15,6	13,4	19,5	15,0	42,4	19,6	72
Novembre	13,4	14,5	18,6	11,3	6,7	12,0	9,2	14,8	17,1	17,8	19,4	
Décembre	32,2	32,0	23,4	26,5	9,0	18,0	17,7	24,6	10,8		12,1	12
Total	98,8	80,4	221,2	236,6	144,8	205,1	164,6	232	193,9	235	175,5	
Moyenne mensuelle		14,6	18,4	19,9	12,05	18,7	13,7	19,4	16,1	19,6	14,6	

Le fait que les pics apparaissent plus marqués par la méthode de mesure magnétique que par la méthode de dosage chimique du fer peut s'expliquer par le fait que les retombées représentent un mélange de fer cosmique peu oxydé et de fer

terrestre très hydraté et très peu magnétique.

Malgré le soin que nous avons mis à ces mesures, il importe de souligner que les méthodes que nous avons utilisées sont encore relativement mal définies. Nous nous efforcerons, dans ce qui suit, d'évaluer l'imprécision apportée par ces définitions imparfaites.

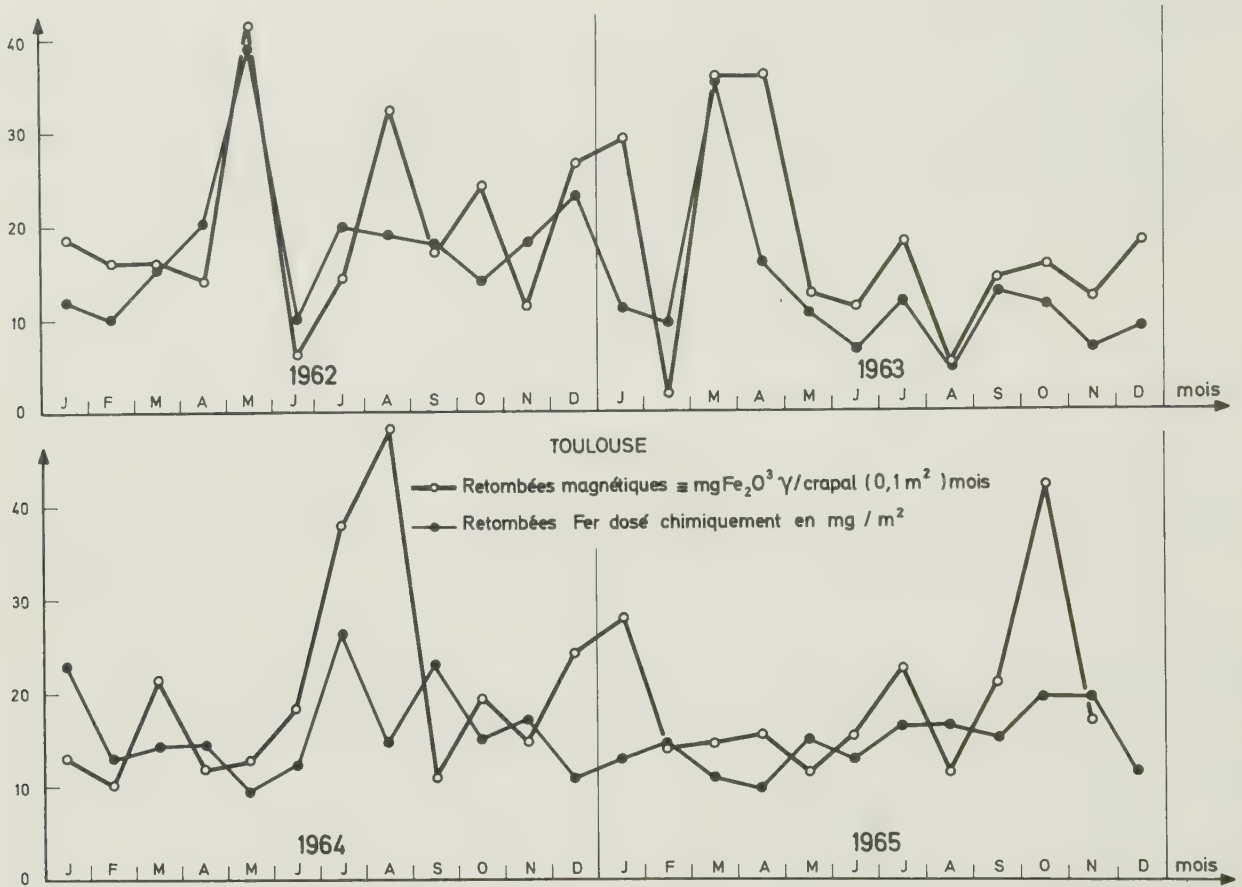


Figure 1

II - LES RESULTATS

Les collections au niveau du sol sont théoriquement les seules méthodes qui devraient donner une mesure directe des retombées, mais en raison même de la proximité du sol, elles sont sujettes à une indétermination majeure sur l'origine de la poussière collectée. En effet, cette poussière comprend aussi tous les types de retombées d'origine terrestre : poussières industrielles, éléments arrachés à la mer puis redéposés sur les continents, poussières dues à l'érosion du sol transportées par le vent.

Nous allons tenter d'estimer quelle peut être la contamination maximale due aux poussières provenant de ces diverses origines.

a) - Pollution industrielle en France

Les évaluations les plus complètes de la quantité de poussières introduites dans l'atmosphère par l'industrie ont été faites par l'Electricité de France.

Ces poussières peuvent se diviser en deux grandes catégories : celles provenant de la combustion et celles provenant des cimenteries.

En 1966, l'ensemble des poussières introduites dans l'atmosphère en France par les combustions représentait 950 000 tonnes, et les cimenteries en introduisaient 131 000 tonnes.

Les cartes représentant la répartition des retombées autour des points d'émission montrent que dans le premier kilomètre, cette décroissance est rapide et qu'environ tous les deux kilomètres la quantité de poussières déposée décroît de moitié. Au-delà de 6 à 10 kilomètres la décroissance est plus lente et dépend plus étroitement de la direction des vents dominants.

Si l'on estime que 90 % de ces poussières retombent sur les régions industrielles dont la superficie, en France, peut être évaluée à 10 % du territoire, on aurait, par exemple pour la zone industrielle située à l'Est du Bassin Parisien, une retombée d'origine industrielle qui s'élèverait à $20 \text{ g/m}^2 \text{ an}$, en négligeant les retombées particulièrement importantes localisées tout près des sources. Comme, en fait, ces retombées très importantes portent sur 50 et 75 % du total, si l'on tient compte de ce phénomène, on trouve que, en dehors des villes, la retombée de poussières industrielles est de l'ordre de $10 \text{ à } 5 \text{ g/m}^2 \text{ an}$. C'est effectivement l'ordre de grandeur de ce que nous mesurons dans les CRAPALS situés dans les zones industrielles, par exemple à 15 kilomètres de Lille sur un aérodrome, ou à 20 à 30 kilomètres de Paris aux stations de collection d'Orsay, de Saclay, etc...

Si l'on tient donc compte de cette répartition autour des centres industriels d'après les données que nous avons, le reste du territoire ne recevra que $0,2 \text{ g/m}^2 \text{ an}$ de poussière d'origine industrielle, ce qui, comme nous le verrons est insignifiant par rapport au reste de la retombée. De plus, cette pollution industrielle apparaît comme moins importante encore dans les régions côtières et spécialement dans celles situées dans l'Ouest de la France. En effet, les vents dominants entraînent les rejets locaux vers l'Est et le Centre de la France.

Par ailleurs, ces rejets locaux variant d'un facteur 1 000 environ entre un département industriel comme le Nord et un département peu industrialisé comme les Landes où les quelques sources d'énergie sont fournies par le gaz de Lacq ou le fuel. Dans ces dernières régions, on peut estimer que la contribution industrielle ne dépasse pas $0,02 \text{ g/m}^2 \text{ an}$.

On voit donc que la contribution industrielle, même dans un pays techniquement avancé comme la France, ne constitue pas une interdiction pour l'étude de la retombée par collection directe au sol.

b) - Apport dû à l'érosion de la mer

L'apport dû à l'érosion de la mer peut être évalué soit en utilisant les mesures de concentrations des aérosols au-dessus de la mer, soit les mesures des principaux éléments d'origine marine dans les précipitations ou dans les fleuves. Pour notre étude, nous préférons employer cette deuxième méthode d'estimation.

CONWAY (1943) a proposé d'attribuer la moitié de la quantité de chlorure de sodium présent dans les fleuves à l'érosion continentale, l'autre moitié provenant de l'érosion marine. D'après cette hypothèse on aurait donc $1,25 \cdot 10^8$ tonnes par an de chlorure de sodium provenant des océans.

D'après les mesures de salinité de l'eau de pluie effectuées par MORELLI

(1968) soit $0,6 \cdot 10^{-6}$ g/litre, on trouve un apport de NaCl égal à $2 \cdot 10^8$ tonnes par an de NaCl tombant sur la surface de la Terre, soit $0,4 \text{ g/m}^2$ an. Comme les continents ne représentent que 28 % de la surface du Globe, on arrive donc à un chiffre légèrement inférieur à celui de CONWAY.

Si les autres substances minérales insolubles présentes dans la mer subissaient le même cycle que celui du sodium lors de l'érosion marine elles ne représenteraient que :

$$\frac{100 \cdot 10^{-6} \text{ g/l}}{33 \text{ g/l}} = 3 \cdot 10^{-6}$$

de la masse de NaCl déposée, soit 40 tonnes par an pour les continents, puisque la teneur en insolubles est généralement évaluée à $1 \cdot 10^{-4}$ g/l contre 33 g pour le sodium.

Si nous adoptons la théorie de KOMABAYASI (1962), et si nous supposons que les particules minérales arrachées à l'eau de mer peuvent être enrichies dans les aérosols encore plus que les ions lourds, cette valeur de 40 tonnes pourrait être augmentée. Cependant, cet enrichissement n'a jamais été mesuré il est donc difficile de fixer une valeur limite.

c) - Apport dû à l'érosion des continents

Il n'est pas possible de faire, comme dans les deux autres cas, une évaluation générale de l'apport dû à l'érosion des continents, celui-ci dépend beaucoup plus de conditions locales variables dans le temps. Par conséquent nous devons dans ce cas, évaluer chaque fois cette contribution à l'aide de considérations soit géographiques, soit météorologiques.

1° - Les stations et les variations globales

La principale difficulté d'application de la méthode de collection au sol pour évaluer la quantité de matière d'origine cosmique annuellement accrêtée par la Terre étant la différenciation entre la retombée réelle et la poussière due à la pollution, il était nécessaire de rechercher s'il existait des stations où cette pollution pouvait être absente. Les moyennes annuelles enregistrées dans les diverses stations pouvaient être une indication de pollution éventuelle. Effectivement, la moyenne de cinq années de mesures montrait un regroupement des stations en deux séries, celle où cette moyenne se situait en poids magnétique autour de 2 mg de $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ et celles où cette moyenne était nettement plus importante, ce qui dénotait une pollution par les centres industriels proches.

On pouvait dès lors définir un "réseau propre", qui ne semblait recevoir que des retombées naturelles. Par ailleurs, on savait que l'érosion éolienne dans les stations de ce réseau qui étaient situées principalement dans les régions Ouest de la France, directement sous l'influence océanique, était négligeable, puisque les collecteurs CRAPAL employés ne sont sensibles qu'aux insolubles - donc insensibles au chlorure de sodium - et nous avons vu que la très faible teneur des insolubles présents dans les mers rendait cette dernière contribution très faible. Il fallait dès lors supposer que ces retombées représenteraient soit un "bruit de fond" des poussières d'origine terrestre régulièrement réparties et de source lointaine, soit étaient d'origine cosmique, les interrelations de ces poussières avec les autres types de retombées nous aiderons à nous faire une opinion sur ce point.

De plus, une première campagne de prélèvements au-dessus de l'Atlantique montrait que les quantités de poussières magnétiques au-dessus des Océans était du même ordre de grandeur que celles recueillies dans les stations du réseau propres ce qui accréditait l'hypothèse que ces poussières étaient bien d'origine naturelle. Un autre fait en faveur de cette hypothèse était que des mesures effectuées sur des collections de poussières dans des stations situées outre-mer présentaient les mêmes valeurs (T. GRJEBINE, 1964).

Cependant, l'accumulation des informations nous a amenés à réévaluer le bien-fondé de cette hypothèse. En effet, des stations qui jusqu'alors étaient considérées comme des stations du réseau propre montraient brusquement une augmentation d'un facteur 9 de leur moyenne annuelle, ce qui pouvait s'expliquer soit par l'implantation de travaux dans la région, soit par la naissance d'une nouvelle industrie. Ceci nous a montré qu'il n'était pas possible de définir en toute rigueur un réseau propre. On a donc été amené à travailler, non plus sur des moyennes obtenues dans des stations présélectionnées, mais sur les valeurs médianes des retombées considérées d'une manière indépendante ou bien sur les distributions médianes des stations en considérant que les modifications apportées au voisinage des stations avaient une certaine constante de temps, ce qui permettait de garder les années non polluées et de rejeter les années polluées.

Si l'on rejette les valeurs supérieures à la moitié ou au trois quart de la valeur médiane, il faut déterminer les indices qui nous permettent de penser que la retombée magnétique mesurée est soit d'origine purement locale soit d'origine stratosphérique.

Les courbes figures 2 et 3 montrent la répartition des retombées mensuelles par CRAPAL pour les stations situées en France et en France d'outre-mer. Sur ces courbes, plusieurs faits peuvent être mis en évidence :

1° - en France et outre-mer, les retombées inférieures à 1 mg de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \gamma$ par mois sont très rares. Etant donné que certaines des stations présentant cette valeur minimale sont situées dans des régions très humides, donc où le transport d'éléments dus à l'érosion éolienne est insignifiant, et loin de toute industrie, il est possible de considérer que l'on a toujours un minimum de poussière, indépendant des conditions locales. On a donc de fortes raisons de penser que ce minimum est d'origine stratosphérique, ce qui sera renforcé par les relations que l'on trouvera par la suite avec les retombées radioactives.

2° - les valeurs les plus fréquentes sont, pour la France et outre-mer situées vers 1,5 mg de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \gamma$ /CRAPAL mois soit 0,5 mg $\text{Fe}_2\text{O}_3 \gamma/\text{m}^2$ jour.

3° - la décroissance de la courbe, au-delà de cette valeur de 1,5 mg, n'est pas la même en France et outre-mer où il y a relativement plus de fortes valeurs que de faibles valeurs. La décroissance de la fréquence diminue de moitié tous les 2 mg en France alors que, outre-mer elle diminue de moitié tous les trois milligrammes. Ceci signifie que, vers les fortes valeurs, les régimes d'injection ne sont plus les mêmes et il faut donc penser qu'outre-mer en plus de la contribution lointaine minimale il y a fréquemment des contributions locales éoliennes.

On est donc amené à sélectionner, parmi les stations d'outre-mer, comme on l'a déjà fait pour les stations françaises, des stations "propres". Comme en France, un troisième élément vient s'ajouter aux indices de l'origine stratosphérique des



Figure 2 - Répartition du poids magnétique de l'ensemble des mesures faites en France.

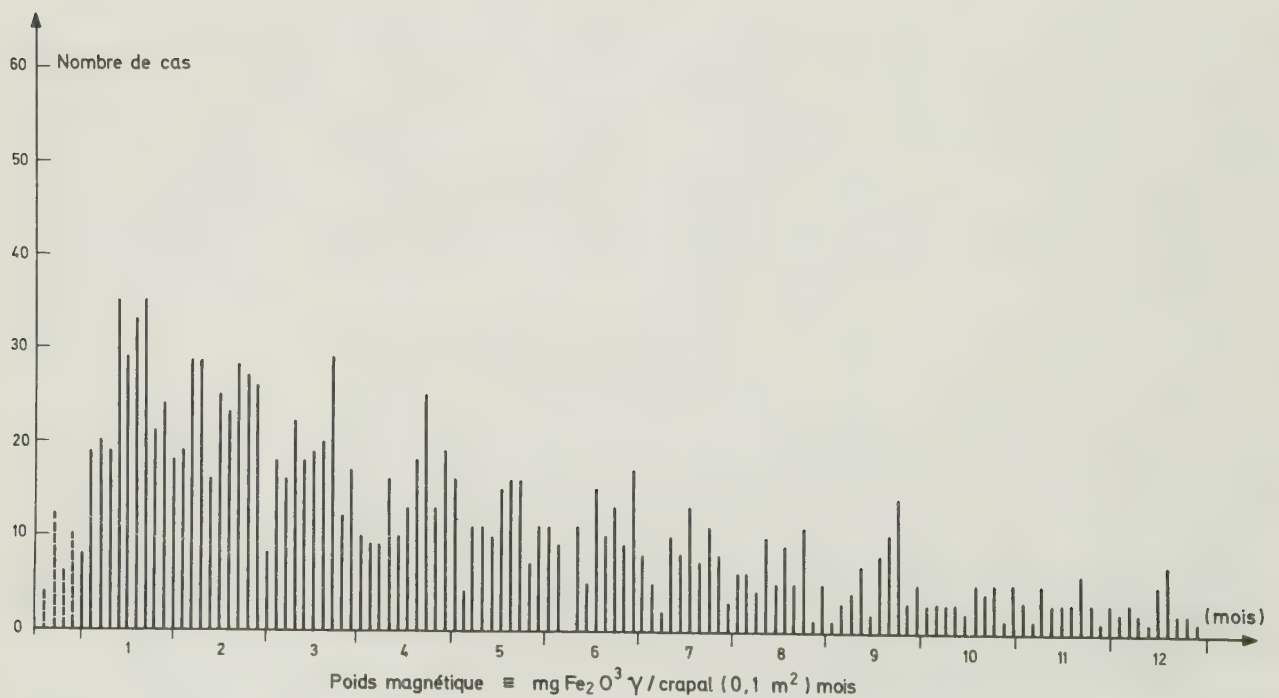


Figure 3 - Répartition du poids magnétique de l'ensemble des mesures faites en France d'outre mer.

poussières, en effet, l'étude des relations entre les retombées magnétiques et les retombées radioactives montre une grande analogie (T. GRJEBINE et al. 1968).

2° - Comparaison entre les retombées magnétiques et les retombées radioactives

A la suite de chaque explosion nucléaire, les débris de la bombe elle-même et des débris de matière terrestre irradiés sont projetés dans l'air. Seule la partie de ces débris qui atteint la stratosphère donnera lieu à une répartition mondiale régulière, c'est donc seulement cette partie qui peut donner lieu à une étude des corrélations entre les poussières radioactives et les poussières magnétiques. Cependant, les retombées radioactives troposphériques sont beaucoup plus importantes. Il sera donc nécessaire de n'étudier les corrélations entre poussières radioactives et magnétiques que pendant les périodes où les retombées troposphériques sont absentes.

La figure 4 donne l'évolution de ces deux types de retombées, retombées radioactives et retombées magnétiques au cours du temps.

On voit sur cette figure qu'il existe, en France, une excellente corrélation entre radioactivité et magnétisme des retombées durant le premier semestre de chaque année où la comparaison n'est pas rendue impossible par l'injection de produits radioactifs provenant d'explosions récentes (1960, sauf février-mars ; 1961, jusqu'en août, 1963 à 1965).

En plus du maximum de printemps, attribué dans le cas de la radioactivité artificielle à une augmentation des échanges stratosphère-troposphère, les courbes de magnétisme présentent un deuxième maximum, non corrélé à la radioactivité. Si l'on étudie les variations des valeurs médianes mensuelles établies sur 7 années de mesures, on constate que les deux maximums de retombées magnétiques apparaissent nettement sur la courbe F relative à la France (figures 5 et 6). Par contre, seul le maximum de septembre se retrouve sur la courbe S relative aux stations tropicales et subtropicales de l'hémisphère Sud.

Dans la statistique des retombées des régions tropicales ou subtropicales, on a éliminé toutes les stations de zones désertiques et latéritiques dans lesquelles la contribution par érosion éolienne du sol est prépondérante ou les stations comme celle des îles Kerguelen qui, bien que situées dans des zones froides, présentent aussi une contribution locale importante car le sol souvent nu est soumis à une érosion éolienne violente.

La courbe relative aux retombées magnétiques en France montre une excellente analogie du comportement des poussières magnétiques et des poussières radioactives dans la première partie de l'année. En effet, le maximum de printemps, bien connu pour les retombées radioactives des régions tempérées apparaît nettement dans les retombées magnétiques. Une explication météorologique a été fournie pour le maximum de retombées au printemps des poussières radioactives : une remontée de la tropopause libère un stock de poussière accumulé juste au-dessus de cette tropopause. Il est donc logique d'appliquer la même explication aux retombées magnétiques et par conséquent, ce premier maximum de printemps de poussières magnétiques est en faveur d'une origine stratosphérique de cette poussière.

Ce maximum de printemps n'existe pas pour les retombées radioactives dans les régions tropicales ou subtropicales, de même il n'existe pas, dans ces mêmes régions pour les poussières magnétiques.

D'après ces courbes, on constate un deuxième maximum de retombées magnétiques

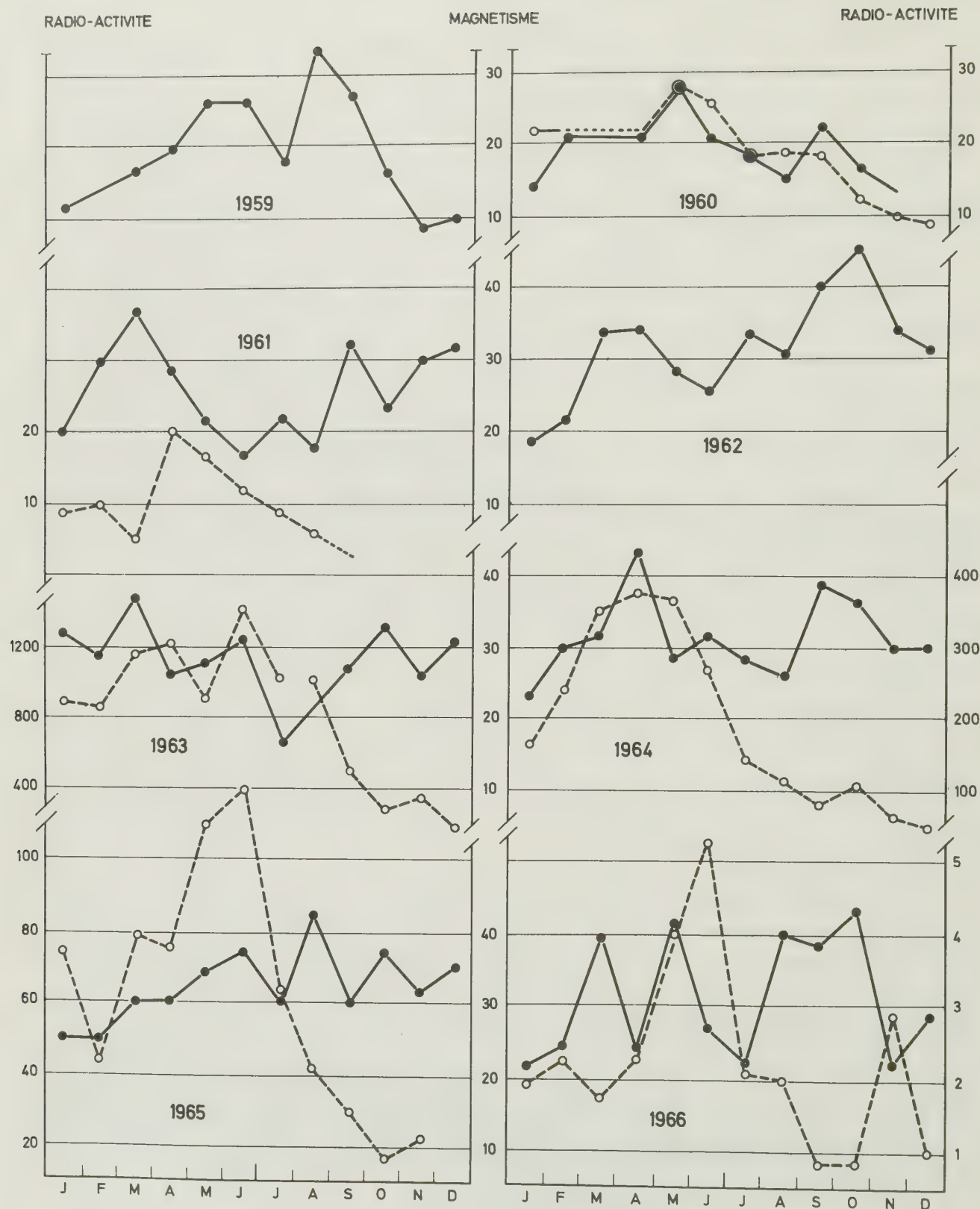


Figure 4

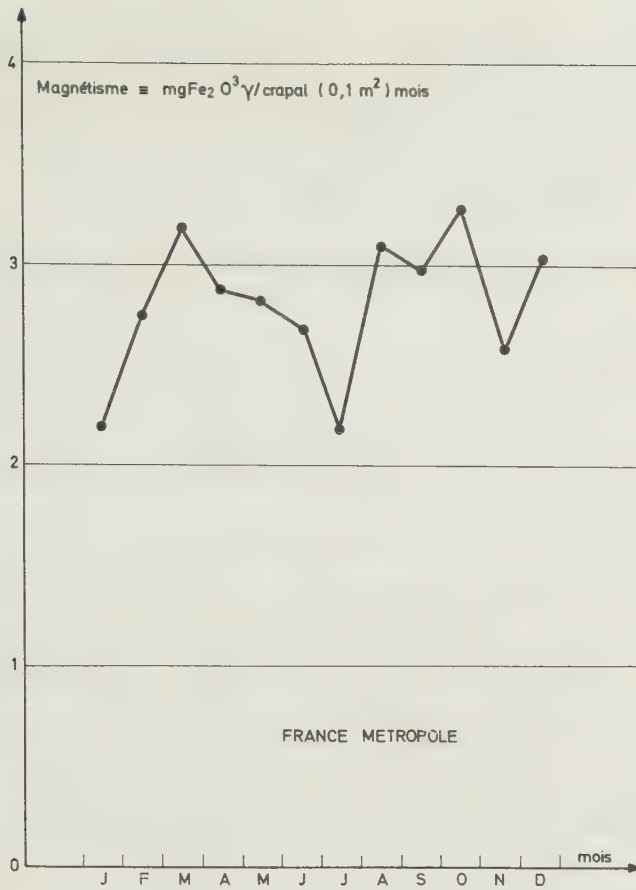


Figure 5 - Valeurs médianes
des magnétismes des collections
des crapals de France

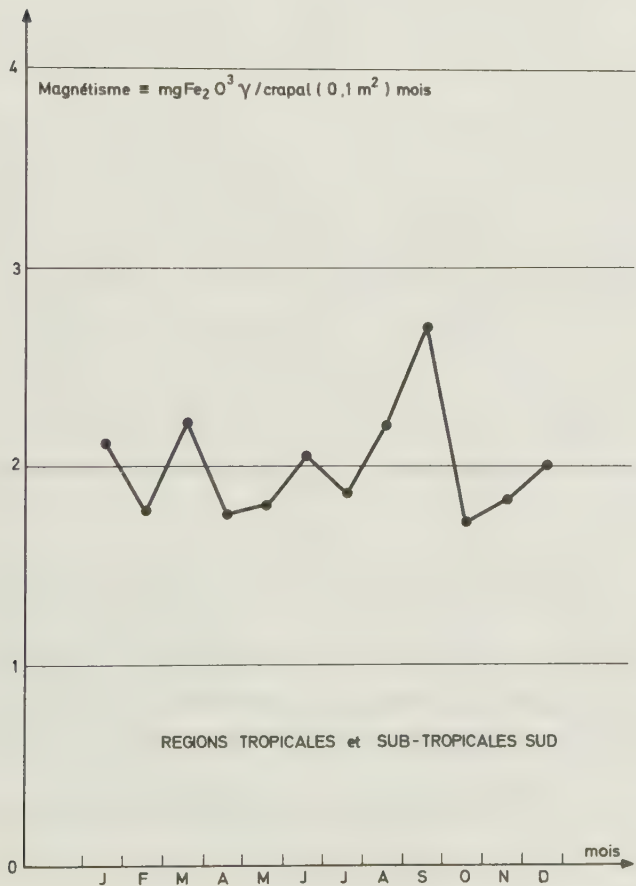


Figure 6 - Valeurs médianes
des magnétismes des collections
des crapals d'Outre Mer

qui apparaît sur Terre au même moment quelle que soit la situation géographique, comme il ne s'accompagne pas d'un maximum de retombée radioactive, il est difficile d'admettre soit une explication météorologique, soit une explication par un échange stratosphère-troposphère. Pour les mêmes raisons il ne peut être attribué à des poussières fines d'origine terrestre, volcaniques par exemple, qui pourraient être stockées dans la stratosphère.

On peut avancer plusieurs hypothèses pour tenter d'expliquer la présence de ce pic :

1° - Hypothèse troposphérique : Dans la deuxième partie de l'année, la pluviométrie accuse un maximum mondial. Ce surplus de pluie pourrait entraîner au sol d'avantage de poussière troposphérique d'origine terrestre. Cependant, ce maximum de pluviosité est expliqué par différents auteurs* comme étant dû aux poussières météoriques introduites dans l'atmosphère en juillet-août.

2° - La poussière responsable de ce pic serait d'origine cosmique.

Enfin, il convient de noter que les divers maximums observés se superposent à une composante continue dont il n'est pas possible de préciser l'origine par ces comparaisons radioactivité-magnétisme. Cette composante est cependant responsable des trois-quarts des retombées magnétiques (valeur déduite de la figure 5).

Les relations entre les retombées de poussière et la pluie peuvent probablement nous apporter quelques précisions supplémentaires à ce sujet, c'est pourquoi nous avons entrepris une étude des relations entre les retombées magnétiques et la pluie.

3° - Relations entre les retombées magnétiques et la pluie

De nombreuses études ont porté d'une part sur le rôle de la poussière très fine lors de la formation des nuages et d'autre part sur les relations entre les chutes de poussières radioactives et la pluie.

MIYAKE et al. (1957) et Y. YOKOYAMA (1966) ont proposé des lois de nettoyage des poussières radioactives par la pluie qui se vérifient bien si l'on prend des valeurs statistiques moyennes. T. GRJEBINE, G. LAMBERT et J. LABEYRIE (1966) ont examiné les variations de ces relations pour différents cas d'injection de poussière dans la troposphère et dans la stratosphère. Plus récemment NGUYEN BA CUONG et G. LAMBERT (1967) ont montré que les précipitations de poussière au sol dépendaient d'autres facteurs que la pluie et que notamment le relief jouait un rôle important.

En France, à l'échelle du mois, on ne voit aucune relation entre les retombées magnétiques et la pluie, aussi bien dans les régions où les contributions industrielles sont importantes que dans les régions où ces contributions sont absentes.

Les figures 7 et 8 présentent les valeurs des retombées magnétiques en fonction de la pluie pour deux stations à pluviométrie importante : Rostrenen et Lille, Lille se trouvant dans une zone industrielle. Cependant, cette indépendance des deux facteurs à l'échelle du mois ne signifie pas une indépendance pour une pluie, mais indique l'indépendance, à l'échelle du mois, entre la reconstitution du réservoir de poussière et la fréquence des pluies. Ceci veut donc dire que nous sommes

* BOWEN et son école.

privés de ce facteur pour éventuellement discriminer les stations avec contribution éolienne locale des stations à contribution uniquement stratosphérique.

Cependant, s'il n'est pas possible d'établir de relation entre les retombées magnétiques et la pluie pour une seule station, il semble que si l'on sépare les relations pour les mois de mars, avril, mai de celles pour les mois d'août, septembre, octobre et qu'on les étudie dans deux stations placées sous une influence maritime (Rostronem et Arcachon), on voit déjà apparaître deux distributions qui ne semblent plus identiques (figures 9 et 10).

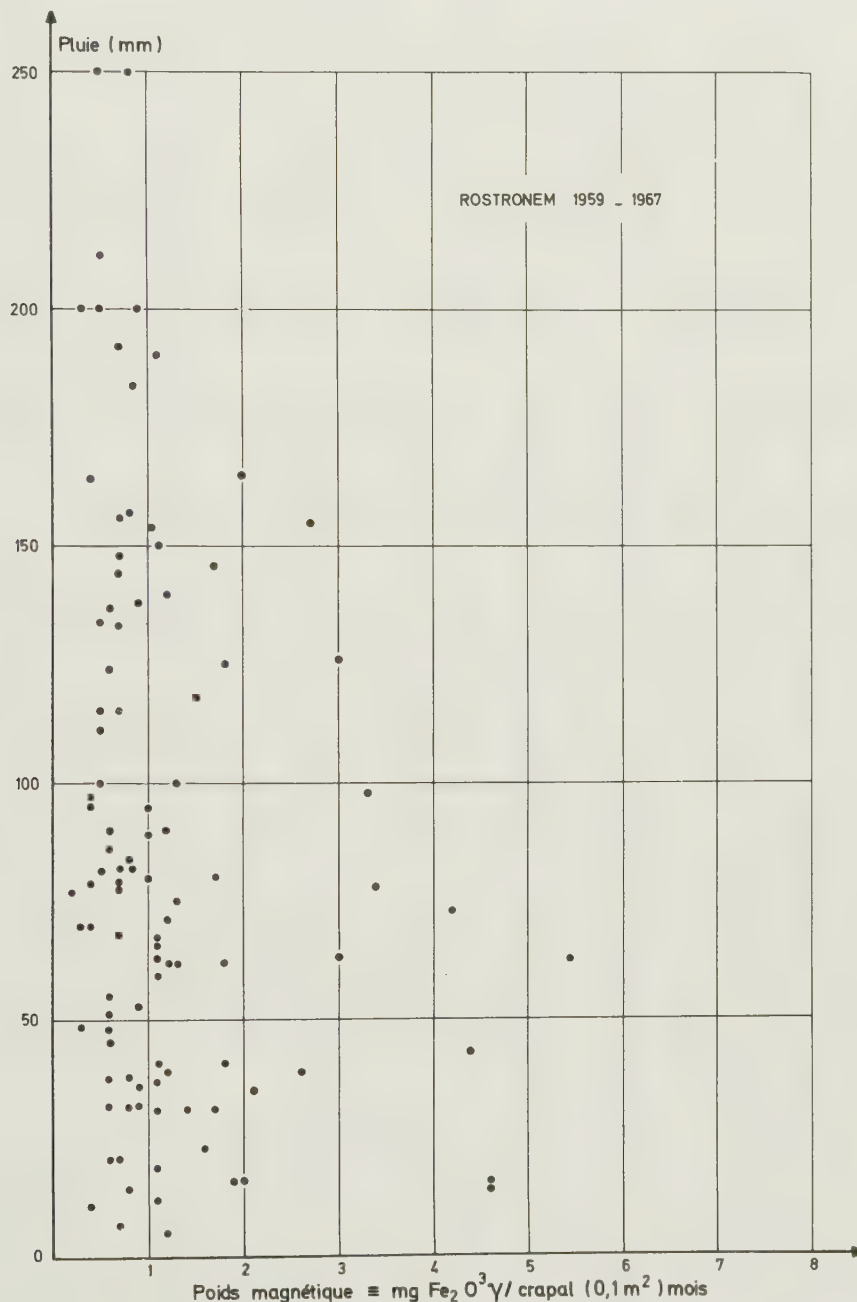


Figure 7 - Relation pluie-retombées magnétiques

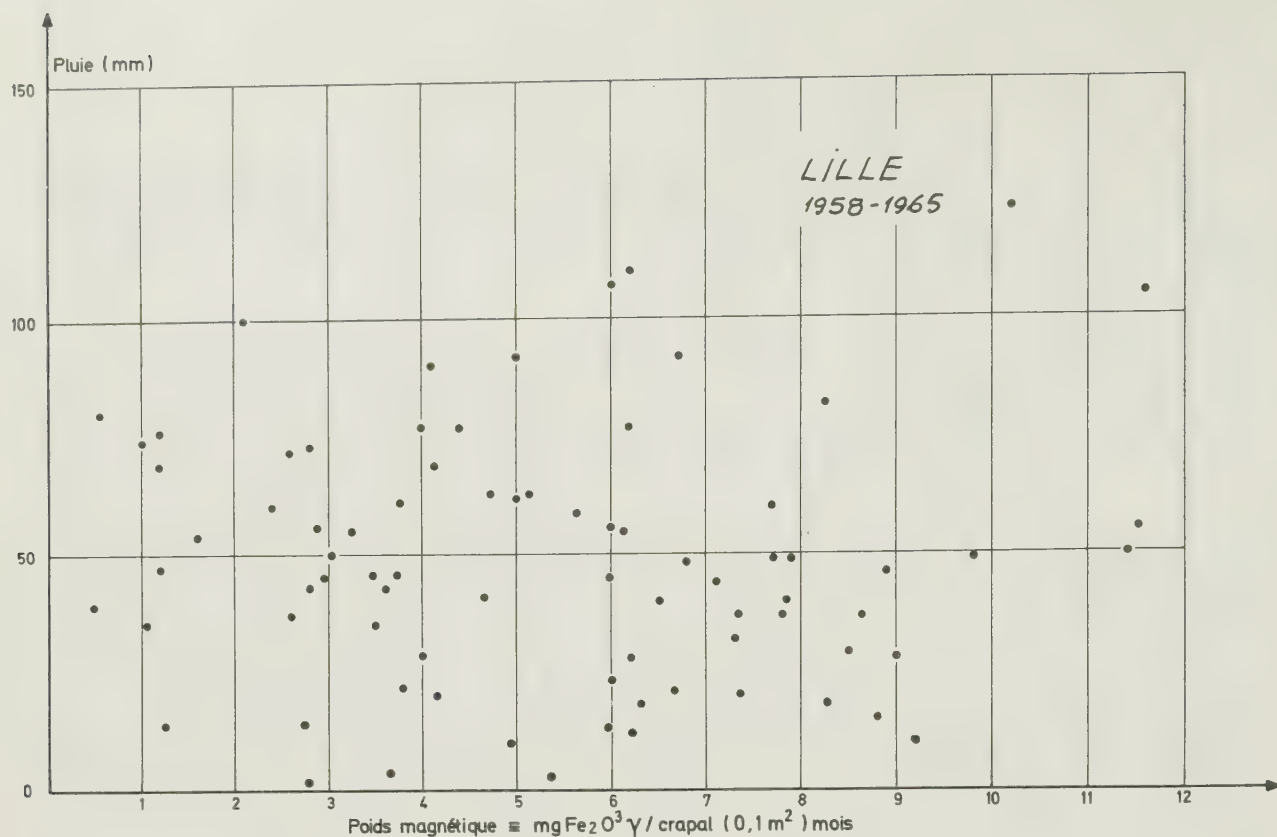


Figure 8 - Relation pluie-retombées magnétiques

Si l'on utilise l'ensemble des stations, les lois générales prédominent et l'on voit sur la figure 11 une remarquable corrélation entre les poussières magnétiques et la pluie (tableaux 2 et 3).

Les deux courbes présentent un minimum au mois de mars, un minimum au mois de juillet et un deuxième maximum dans la deuxième partie de l'année. Dans le cas du deuxième maximum, alors que les retombées atteignent une forte valeur puis se stabilisent, la pluie continue à augmenter. En novembre le taux de retombée de poussières diminue pour atteindre une valeur minimale en janvier alors que des pluies fines seront encore condensées par les poussières fines restantes.

On sait que BOWEN (1953) ainsi que d'autres auteurs, ont proposé une explication pour les variations annuelles de la pluie. Ces variations seraient le résultat de l'abondance variable de la quantité de poussières cosmiques dans l'atmosphère qui agiraient comme noyaux de condensation pour les nuages. Les corrélations que nous trouvons semblent confirmer cette hypothèse.

Il faut cependant remarquer que les corrélations entre la pluie et les poussières existent tout au long de l'année et qu'entre autres, elles existent au printemps où l'introduction de poussière se fait à partir de la stratosphère, cette poussière n'étant pas obligatoirement cosmique. Par conséquent cette relation poussière-pluie en août septembre ne nous apporte aucune information nouvelle et ne nous permet pas de trancher sur l'origine cosmique ou non du pic d'août-septembre.

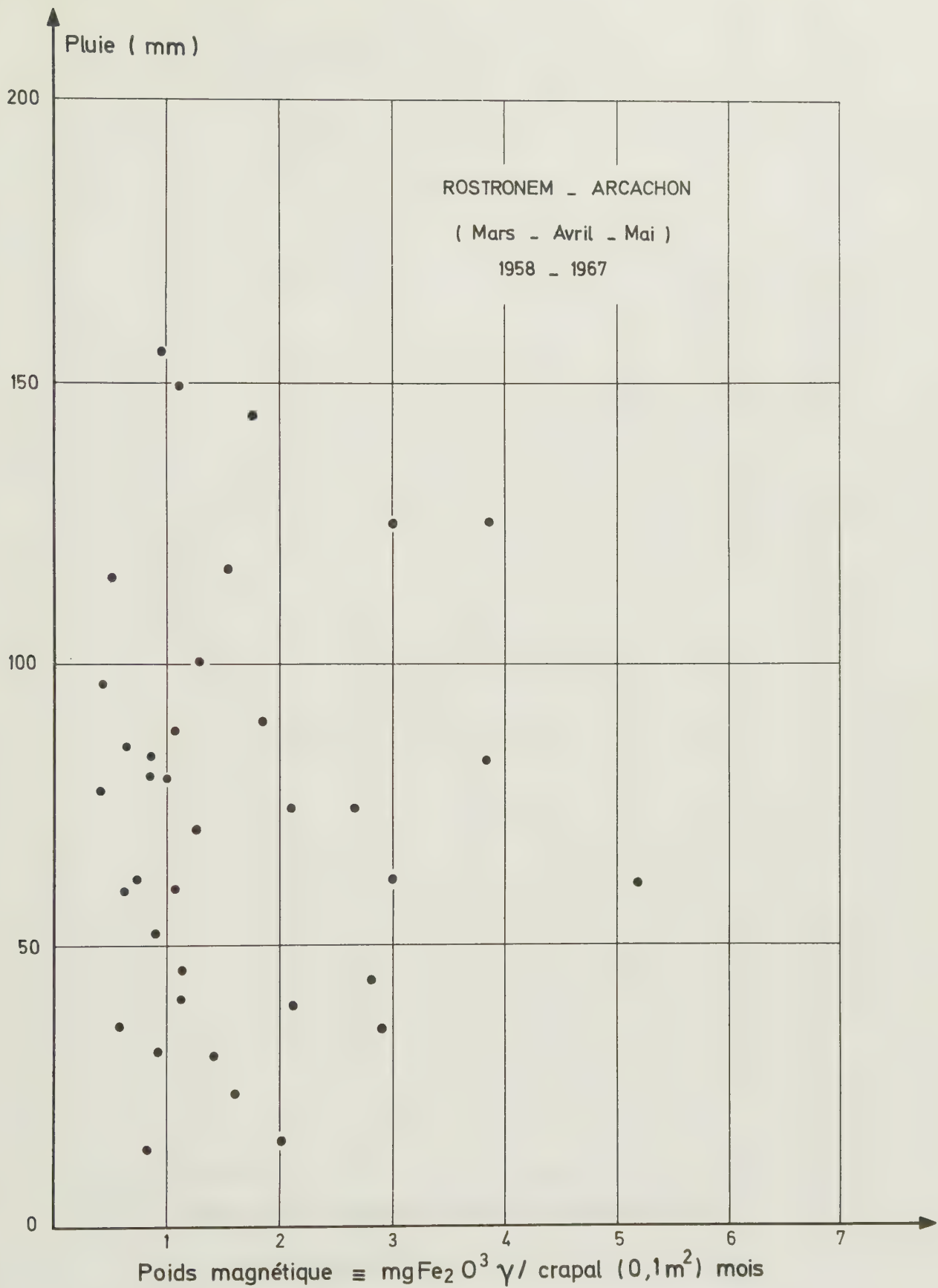


Figure 9 - Relation pluie-retombées magnétiques

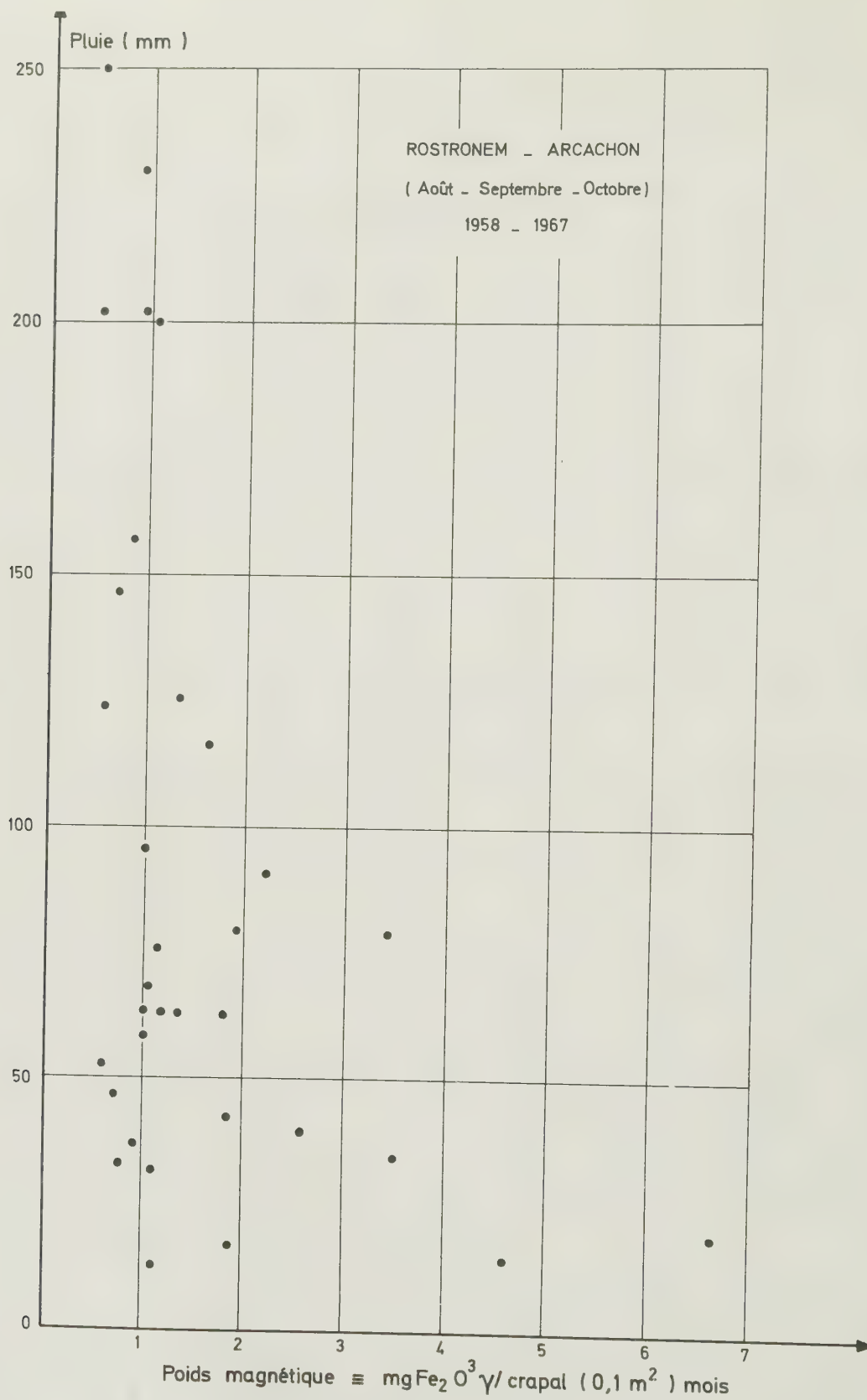


Figure 10 - Relation-pluie-retombée magnétique

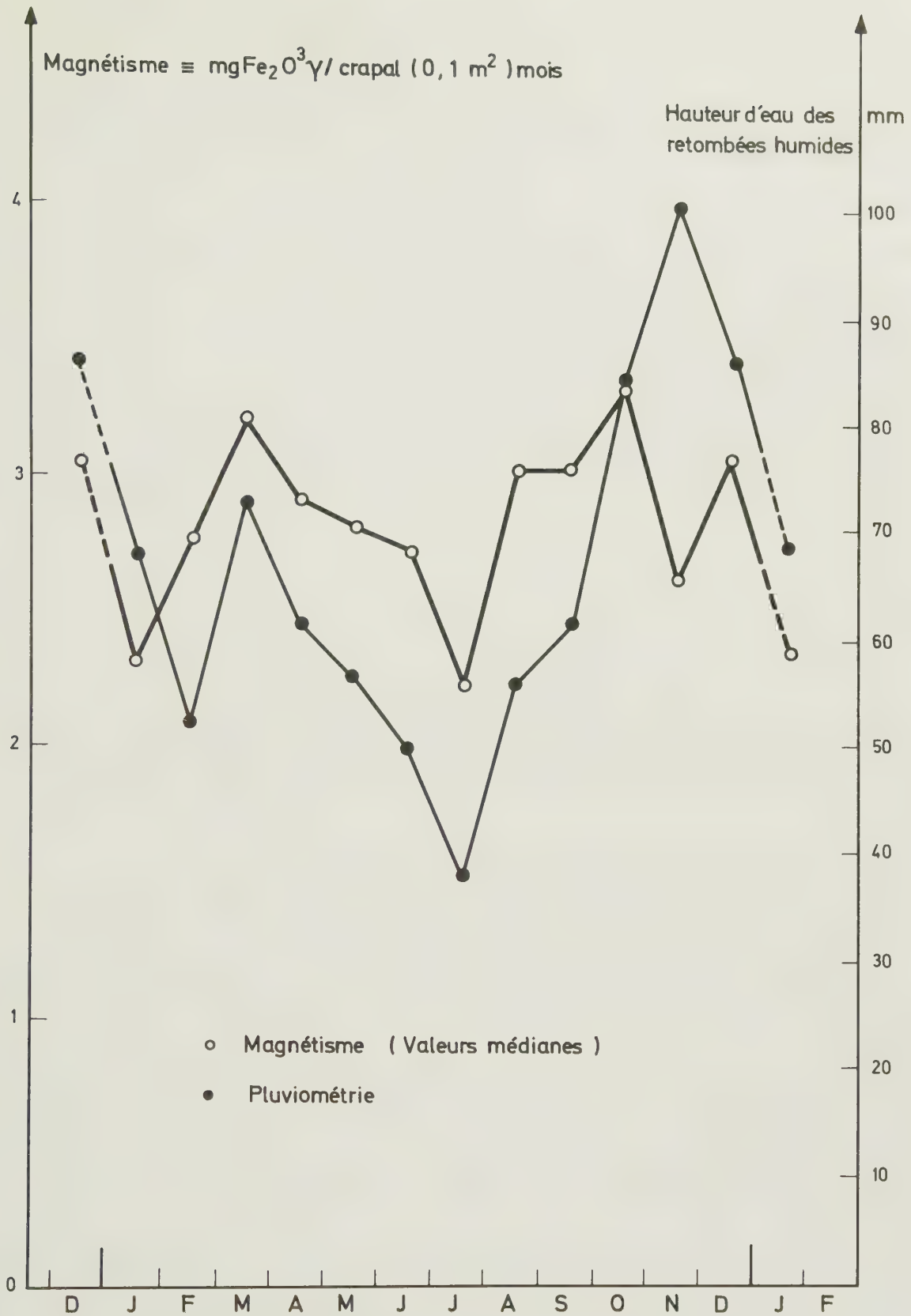


Figure 11 - Valeurs médianes des retombées magnétiques et de la pluie pour les stations de France (1958-1967)

Tableau 2

VALEURS MEDIANES DES RETOMBÉES MAGNETIQUES EN FRANCE
(Station Crapal de 1959 à 1967)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	V.M.
1959	1,2	2,1	1,7	2,0	2,6	2,6	1,8	3,3	2,7	1,6	0,9	1,0	1,9
1960	1,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,5	2,1	1,6	1,6	1,3		1,9
1961	2,6	3,0	3,7	2,9	2,1	1,7	2,2	1,8	3,2	2,3	3,0	3,2	2,6
1962	2,9	2,2	3,4	3,4	2,8	2,6	3,4	3,1	4,0	4,5	3,4	3,1	3,1
1963	3,2	2,9	3,7	2,6	2,8	3,1	1,6	2,2	2,8	3,3	2,6	3,1	2,8
1964	2,3	3,0	3,2	4,3	2,9	3,2	2,8	2,6	3,9	3,6	3,0	3,0	3,1
1965	2,5	2,5	3,0	3,0	3,5	3,7	3,0	4,2	3,0	3,7	3,2	3,6	3,2
1966	2,3	2,6	3,9	2,4	4,2	2,7	2,2	4,0	3,8	4,3	2,3	2,8	4,1
1967	2,2	3,1	3,1	3,1	3,3	2,7	2,0	3,0	2,2	2,1	2,2	1,5	3,9

Tableau 3

VALEURS MEDIANES DE LA PLUVIOMETRIE EN FRANCE
(Station Crapal de 1958 à 1967)

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1958									72	55	59	102
1959	68	8	70	85	44	62	21	56	48	99	75	130
1960	64	66	73	10	49	53	71	110	100	155	110	-
1961	100	45	7	82	53	45	55	30	48	110	100	86
1962	71	50	80	60	64	17	33	23	59	46	100	73
1963	50	-	81	62	50	90	40	129	71	47	109	37
1964	19	54	81	67	64	47	26	41	47	94	53	69
1965	97	10	80	49	66	50	58	71	154	62	122	127
1966	90	103	30	79	57	72	38	76	26	139	108	102
1967	46	69	46	30	86	28	18	52	64	73	77	62

On peut tenter de donner une explication qui permette de concilier l'hypothèse de BOWEN, qui semble bien fondée, et nos mesures en imaginant un mécanisme qui permettrait de ne pas attribuer la totalité de poussière collectée à une origine cosmique, ce qui rendrait les quantités de poussières collectées à terre, compatibles avec celles obtenues par les autres méthodes de détermination des quantités

de poussières cosmiques.

L'explication serait la suivante : il existerait deux mécanismes d'entraînement des poussières au sol, une faible quantité de poussière venant de la stratosphère serait à même de déclencher une pluviosité plus abondante et la pluie ainsi déclenchée entraînerait au sol la charge de poussière se trouvant dans la troposphère. La charge en poussières de la troposphère étant relativement faible pendant les mois d'hiver, au printemps la poussière collectée serait essentiellement la poussière stratosphérique ayant servi de noyau de condensation. Par contre, en été, la charge en poussière de la troposphère augmente, une arrivée très limitée de poussière cosmique dans la stratosphère peut déclencher la pluie qui entraînerait au sol la poussière troposphérique, ce phénomène ayant lieu jusqu'en septembre. En octobre et novembre, les poussières stratosphériques continueraient à être à l'origine d'une forte pluviosité mais la quantité de poussière totale recueillie au sol n'augmenterait plus car la charge troposphérique serait épuisée.

Ce schéma serait très séduisant pour les régions tempérées de l'hémisphère Nord, cependant, il s'applique beaucoup moins bien dans l'hémisphère Sud et les régions tropicales. Mais là aussi l'hypothèse cosmique pour le pic de septembre semble la meilleure.

En effet, si l'on compare les courbes de retombées magnétiques et les courbes de pluviosité (figure 12), on voit que, dans les territoires d'outre-mer, en septembre il existe un maximum de poussière collectée qui correspond à un minimum de pluviosité. Si dans l'hémisphère Nord on avait de forte chute de poussière cosmique en hiver elle déclencherait peut être au maximum temporaire, mais l'évaporation étant plus faible même en précipitant au sol toute l'humidité on ne fera pas un grand pic, c'est ce qui se passe en septembre dans l'hémisphère Sud.

Avant d'attribuer de façon certaine le pic de septembre à des retombées cosmiques, on peut examiner quelles sont les informations que l'on peut tirer de l'étude de l'évolution chronologique et de la comparaison de cette évolution avec les statistiques des météores.

4° - Relations entre les variations chronologiques et les statistiques de météores et météorites

Nous venons de voir, lors des comparaisons entre retombées magnétiques et retombées radioactives que les valeurs médianes annuelles étaient caractérisées par deux pics, l'un au printemps, l'autre dans la deuxième partie de l'année. Il est intéressant de comparer ces distributions avec ce que nous savons de la distribution des météores et des météorites.

La dernière étude sur les variations de fréquences de chutes des météorites a été faite par H.T. MILLARD et H. BROWN. Les auteurs ont cherché à établir l'existence d'éventuelles longues périodes et ont examiné la répartition annuelle des chutes de météorites. Ils croient voir, pour les chondrites pauvres en fer un maximum en janvier, pour les chondrites riches en fer un maximum en mai et un nouveau maximum en septembre pour les chondrites pauvres en fer.

La figure 13 donne la répartition annuelle des chutes de météorites. Cette répartition ne montre aucune analogie avec la répartition des poussières magnétiques pas plus qu'avec celle des météores optiques et des radiométéores.

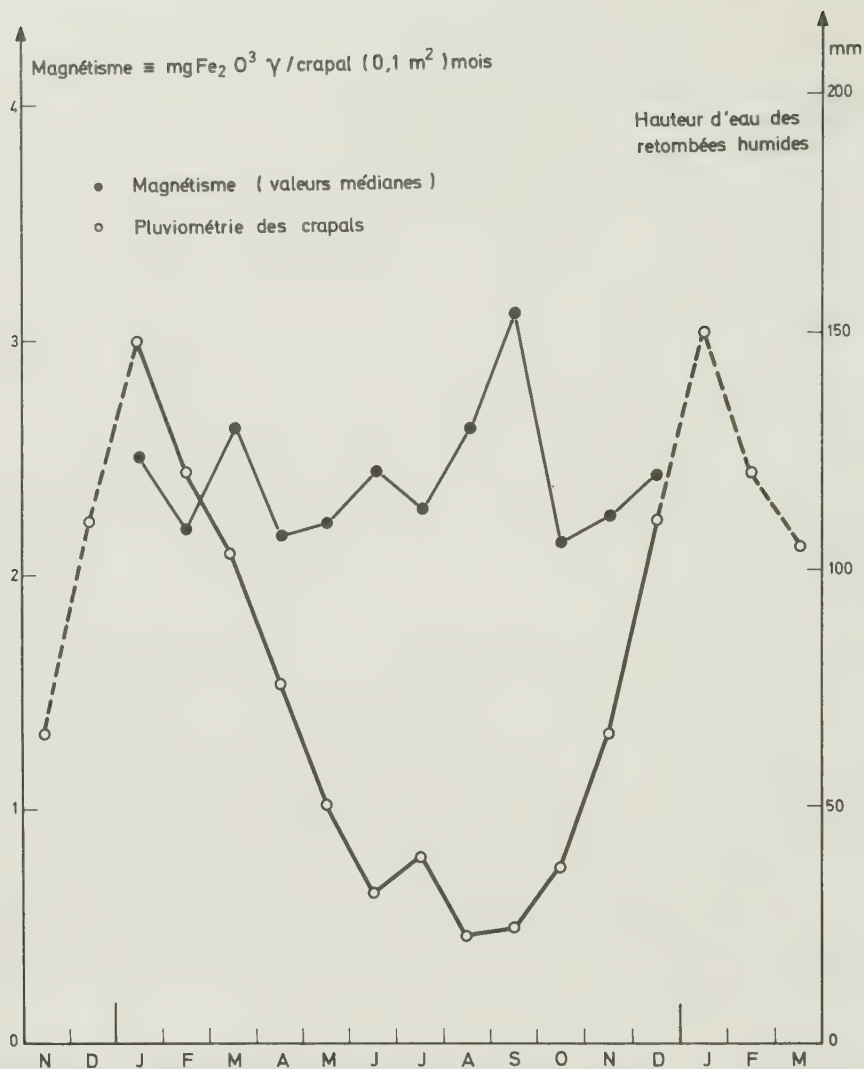


Figure 12 - Pluviométrie des stations "crapal" sub-tropicales (1959-1967)

La comparaison avec la répartition des météores est plus complexe. En effet la taille des météores détectés dépend de la puissance des radars, de la qualité et surtout de l'ouverture des antennes. Ainsi P.M. MILLMAN et B.A. Mc INTOSH (1964) travaillant avec un radar de 20 kW sur 32,7 Mc/s détectent environ 150 échos en moyenne par heure, alors que ESHLEMAN et GALLAGHER (1962) avec une puissance de 100 kW détectent des météores de tailles beaucoup plus petites et obtiennent jusqu'à 2 200 échos par heure, dans ces conditions, les distributions trouvées seront souvent très différentes.

Dans le cas des mesures de MILLMAN, les échos les plus faibles peuvent être confondus avec des interférences qui peuvent avoir des causes variées, notamment des interférences provenant de l'activité solaire. La courbe figure 14 donne la sommation sur cinq ans de tous les échos détectés jour par jour. La courbe en tireté correspond aux échos supérieurs à 8 secondes, elle est donnée à une échelle 10 fois supérieure à celle représentant tous les échos. La proportion d'échos longs

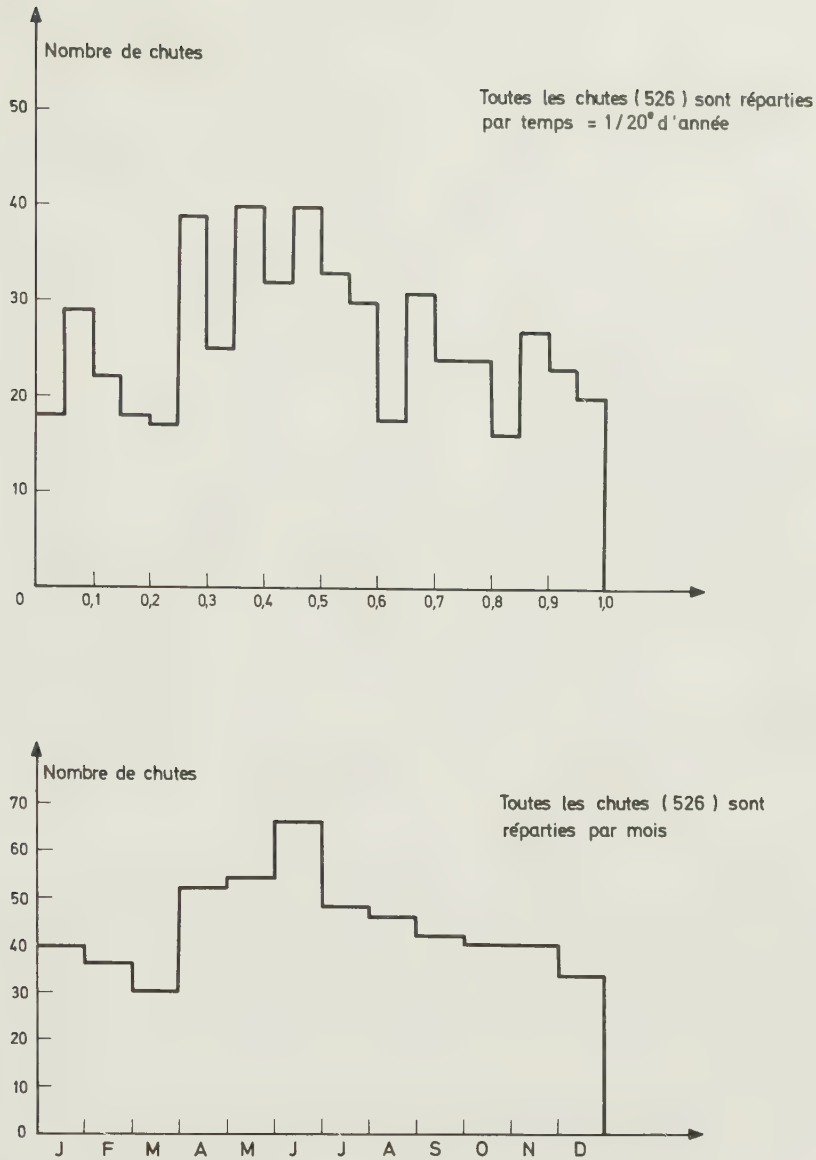


Figure 13 - Distribution annuelle de chutes de météorites d'après H. BROWN et I. GODDARD.

ne dépasse pas en général 2 % de la totalité des échos, toutefois elle atteint 12 % pendant l'averse des Perséides et 10 % pendant l'averse des Géménides.

La figure 15 donne une comparaison entre le flux mensuel de météores et le taux mensuel des retombées magnétiques récoltées dans les CRAPAL. Ces courbes montrent une assez bonne corrélation pour la deuxième partie de l'année et une anticorrélation pour la première partie de l'année. Nous avons vu, par comparaison avec les retombées radioactives, que l'on pouvait attribuer le premier pic de retombée de poussières magnétiques (en anticorrélation avec les météores) à un déblocage de produits stockés dans la stratosphère. Il n'a donc aucune raison d'être en corrélation avec des événements cosmiques. Le pic de la deuxième partie de l'année n'était pas associé de la même manière aux produits radioactifs stockés dans la stratosphère, il devait donc avoir une origine propre, la corrélation que

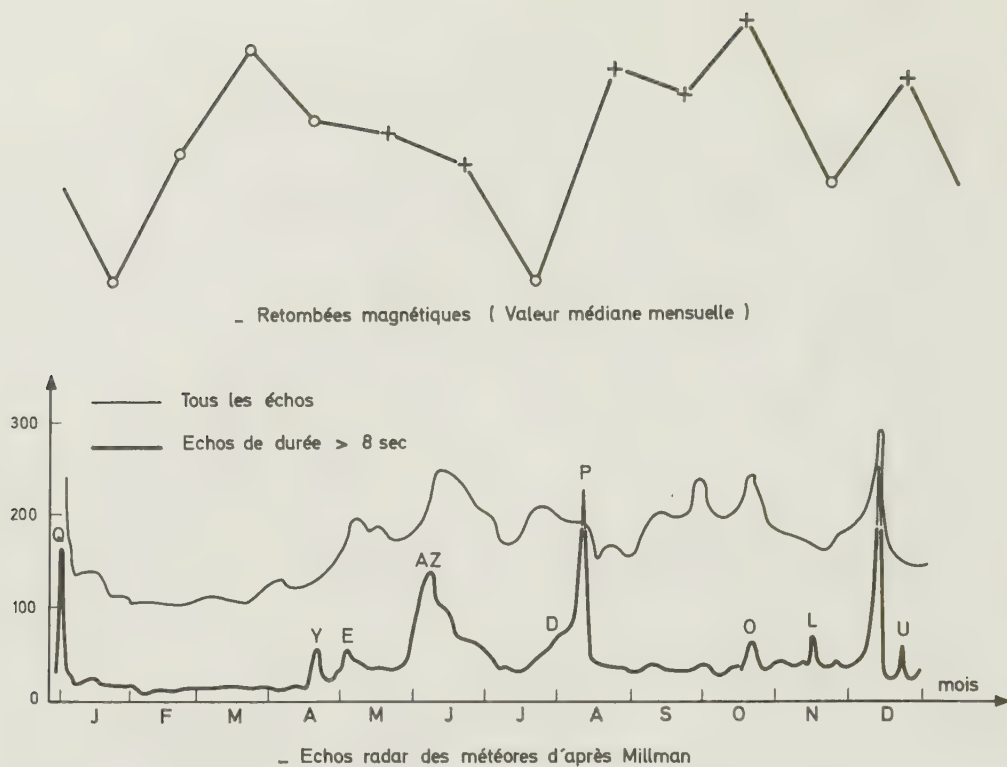


Figure 14 - Retombées magnétiques et échos radar.

nous venons d'établir avec les météores permet de penser que cette origine est cosmique. Ce pic doit donc être dû à des particules de tailles relativement plus grandes qui traversent la stratosphère sans y être stockées et devraient intervenir comme noyaux de condensation dans la troposphère. Ce fait a été montré par les corrélations avec la pluviosité.

Par ailleurs, cette relation a aussi été mise en évidence par CROZIER (1966) qui, en comptant les sphérules dans les retombées actuelles pendant neuf ans constate d'une part une analogie entre le nombre de sphérules et le flux mensuel de météores et observe d'autre part des pics très importants pendant les averses des Perséides et des Géménides.

Makoto SHIMA (1968) en utilisant les mêmes méthodes de comptage observe les mêmes maximums, notamment en août, mais ses valeurs sont supérieures à celles de CROZIER. En utilisant les valeurs trouvées par ces deux auteurs, la masse de poussière accrétée par la Terre serait, pour CROZIER $3,6 \cdot 10^6$ tonnes/an et pour Makoto SHIMA $1,7 \cdot 10^7$ tonnes/an*.

Au cours de notre étude, ce n'est qu'en 1959 que nous avons obtenu très nettement le pic du mois d'août (figure 16), ce pic a été cette année là observé par CROZIER.

* Calculé par nous d'après le nombre et la taille des particules comptées par les auteurs

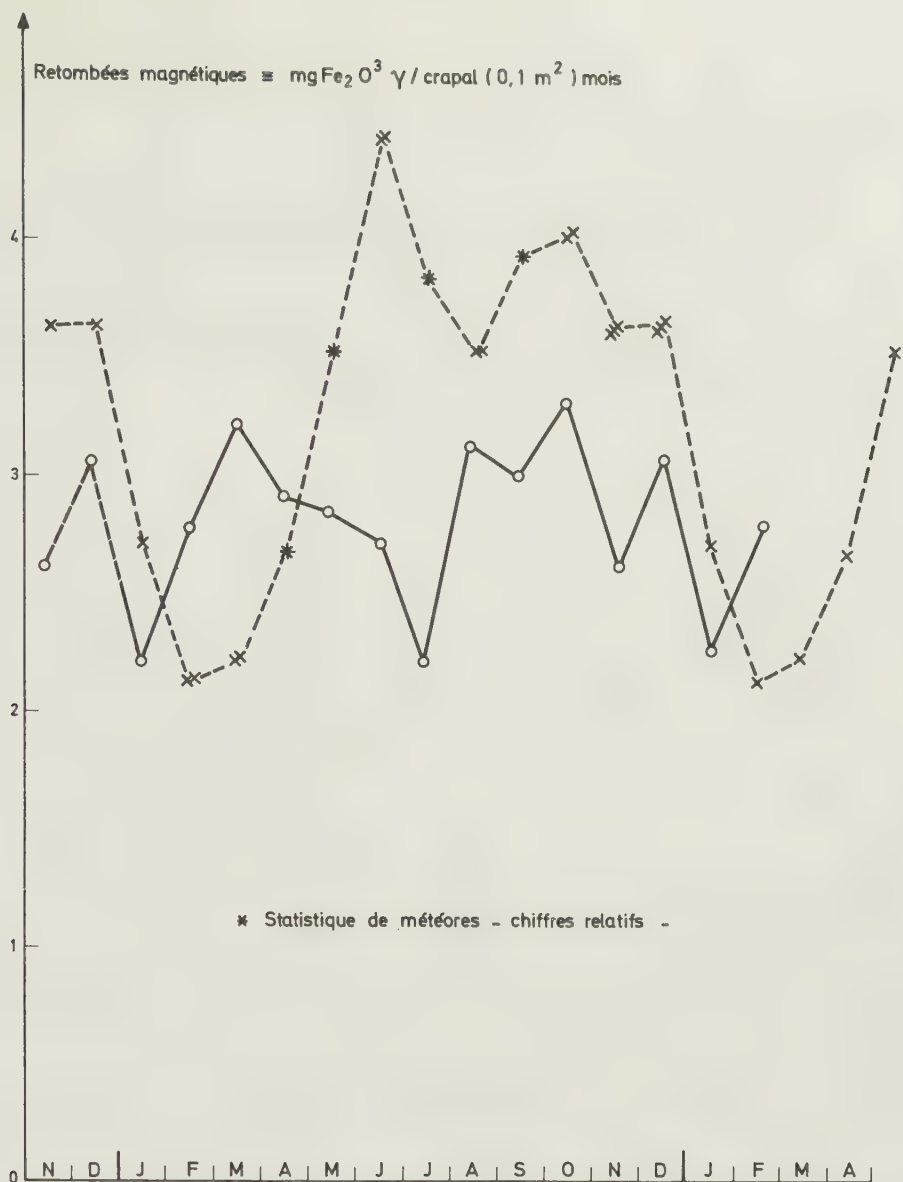


Figure 15 - Taux mensuel des météores d'après MILLMAN, compulsé par CROZIER, comparé aux retombées magnétiques

Au cours de ses mesures, Makoto SHIMA n'observe pas de pic de printemps, ceci s'explique par le fait qu'il n'utilise que des particules pouvant être comptées au microscope, or nous avons vu que le pic de printemps était probablement dû à des poussières beaucoup plus fines stockées dans la stratosphère.

Jusqu'à présent, nous avons effectué des comparaisons entre des valeurs moyennes établies sur plusieurs années de mesures. On peut cependant penser qu'il existe des variations d'années en années qui pourraient, par exemple, être liées à l'activité solaire.

De 1959 à 1965, Mc INTOSH et MILLMAN (1964) ainsi que ELLYETT et KEAY (1964) n'ont observé qu'un seul maximum en 1963 où la valeur était 1/3 plus élevée qu'en 1960. Par la méthode du comptage de sphérules, CROZIER observe lui aussi un seul maximum en 1963 alors que Makoto SHIMA observait plus de sphérules en 1959-1960, en 1963-1964 et en 1966-1967 qu'en 1961-1962 et qu'en 1965, c'est-à-dire avec une

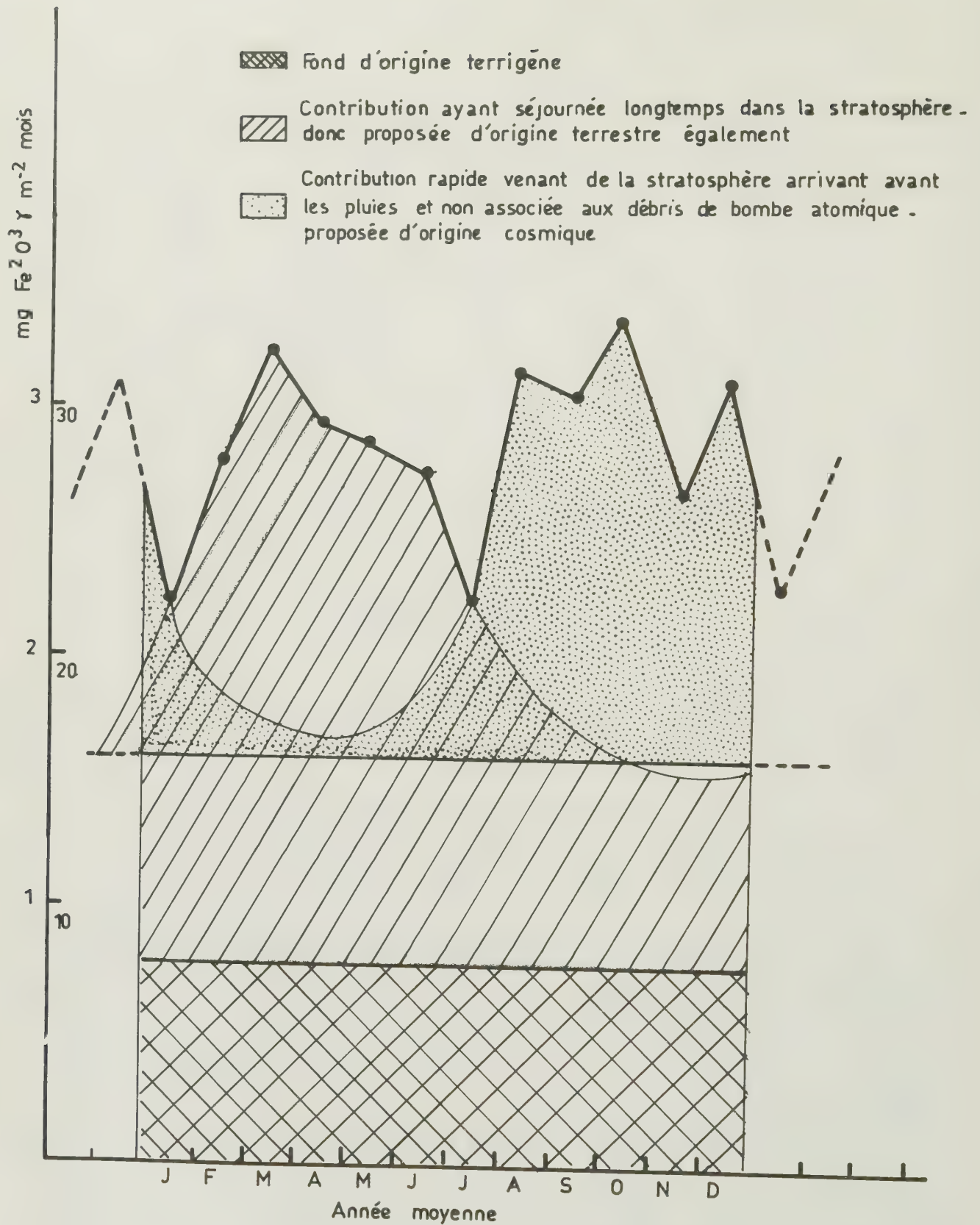


Figure 15 bis - Opération proposée pour les différentes composantes de la poussière magnétique pour une année.

périodicité d'environ 4 ans.

En ce qui concerne les poussières magnétiques, la courbe figure 17 représente les variations des médianes des stations françaises et d'outre-mer. Pour les stations d'outre-mer, nous avons préféré utiliser le premier quartil plutôt que la médiane en raison du nombre élevé de stations présentant une pollution par du matériau provenant de l'érosion locale ou du transport éolien. Les résultats obtenus par les mesures de la retombée magnétique ne se présentent pas de la même façon que ceux obtenus par comptage des sphérules par Makoto SHIMA et CROZIER. Il existe en effet un accroissement à partir de 1961 pour les stations d'outre-mer. Pour les stations de France on observe également cet accroissement avec cependant des valeurs plus faibles en 1966-1967, ce qui semble montrer que cet accroissement n'est dû ni à une modification des conditions d'expérience ni à une contribution industrielle croissante dans le temps. Le maximum observé pour les météores en 1963 n'est pas observable. Il est cependant possible d'expliquer ces divergences de la façon suivante :

La différence de taille (plusieurs magnitudes) entre les météores et les sphérules explique peut-être la différence d'abondance annuelle des deux catégories. La différence de taille entre les poussières magnétiques et les sphérules est peut-être aussi l'explication du non synchronisme des résultats.

III - CRITIQUE DE LA METHODE

Il est maintenant nécessaire de considérer en détail le degré de validité de la méthode des pesées magnétiques globales des collections faites au sol.

L'accord relativement bon que l'on trouve entre ces retombées magnétiques, les retombées radioactives et la pluie permet de penser que les collections effectuées par cette méthode portent principalement sur des poussières qui proviennent de la stratosphère.

Les analogies que l'on constate aussi avec les statistiques des météores semblent montrer que l'on se trouve en présence de poussière cosmique.

Cependant, l'évaluation de la quantité totale de poussière cosmique fondée sur ces valeurs est fortement différente de celle obtenue par d'autres méthodes, ce qui nous porte à penser que l'on est peut-être en présence d'une forte contribution terrestre, même si celle-ci passe par un cycle stratosphérique. Ce mécanisme restant alors à trouver.

IV - CONCLUSIONS

La masse totale de poussière calculée d'après les collections faites avec les CRAPAL se situe dans les milliards de tonnes pour la Terre par an. Toutefois la répartition géographique de ces poussières, leurs relations avec la pluie et la radioactivité ne sont pas entièrement compatibles avec une origine purement terrestre, à moins que la poussière d'origine terrestre ne passe par un cycle stratosphérique. Ces mêmes relations ne sont pas non plus en faveur d'une origine purement cosmique. Nous allons toutefois tenter d'établir, à partir de ces mesures un bilan pour l'ensemble du Globe.

La détermination de la masse de poussière, à partir de pesées magnétiques ne

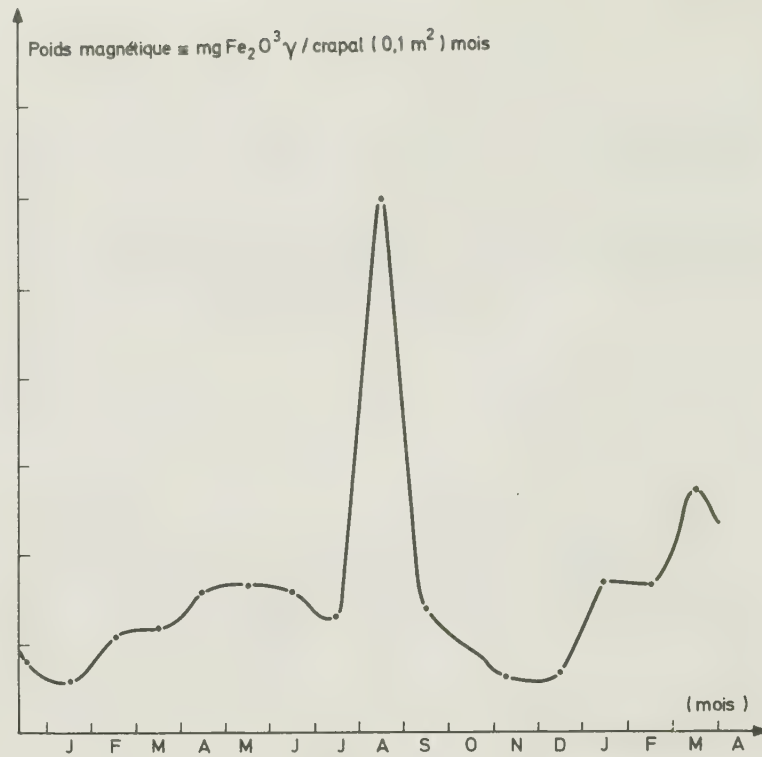


Figure 16 - Valeur moyenne des retombées magnétiques
Réseau Crapal "minimum" France 1959.

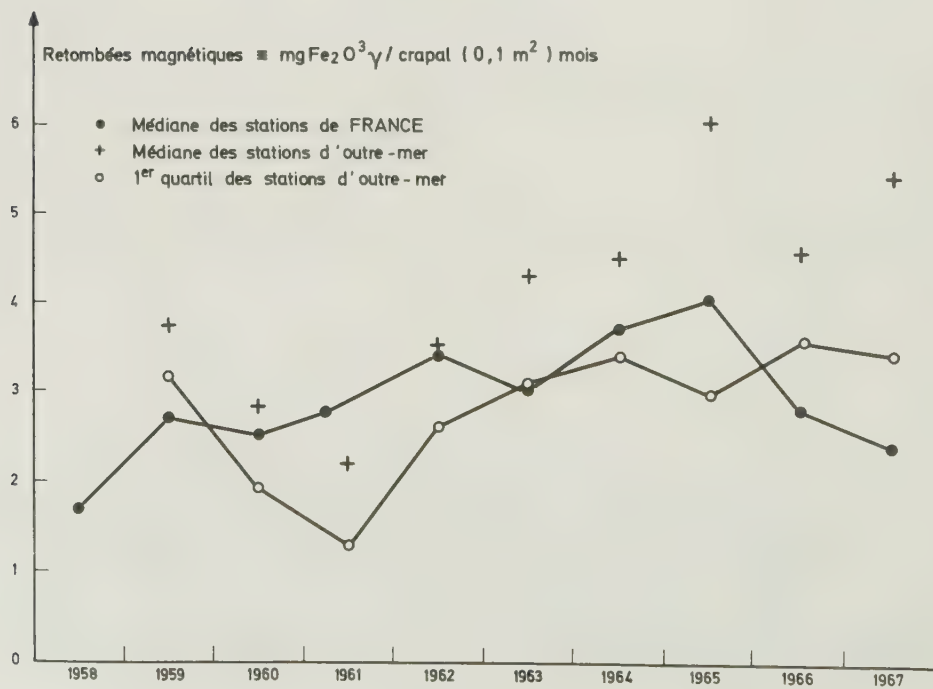


Figure 17 - Variations (1958 à 1967) des retombées magnétiques
médianes annuelles du réseau.

peut se faire qu'en utilisant deux hypothèses peut-être arbitraires :

1° - Le choix de la partie significative des courbes, en supprimant ce que l'on peut considérer comme un bruit de fond dû à une influence terrestre.

2° - Le choix d'un échantillon permettant de convertir les mesures d'attraction magnétique en poids pondéral.

1° - Choix de la partie significative des courbes

Hypothèse_1

On a vu, lorsqu'on a étudié les relations existant entre la quantité de poussière recueillie, la radioactivité et la pluie que seul le pic de poussière apparaissant pendant la seconde partie de l'année semblait indépendant de tout phénomène météorologique. Si, en première approximation, et avec de nombreuses réserves, nous attribuons ce pic à une arrivée de poussière cosmique et si nous considérons que seul ce pic est représentatif de la poussière cosmique, ceci donnera une quantité de poussière magnétique par CRAPAL et par an équivalente à 4 mg de Fe_2O_3 par CRAPAL soit $40 \text{ mg Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^2 \text{ an}$.

Hypothèse_2

Si l'on utilise les corrélations entre les poussières et les statistiques radar des météores, on arrive à une seconde hypothèse ; les variations des retombées magnétiques devraient être de même amplitude par rapport à un bruit de fond que les variations de statistique des météores saisonniers par rapport au bruit de fond des météores sporadiques.

D'après les chiffres de P.M. MILLMAN et Mac INTOSH (1964) la partie continue et la partie variable de la statistique des météores se présentent dans le rapport :

$$\frac{\text{Statistique des météores}}{\text{Partie continue}} = 0,55$$

Cette estimation attribue donc à la partie variable deux fois plus d'importance qu'une estimation antérieure due à LOWELL qui n'attribuait que 1/4 à la partie variable.

Si nous appliquons ce rapport à la poussière magnétique, on voit que la partie variable des retombées de poussières magnétiques représente une quantité de poussière dont le magnétisme est équivalent à 7,25 mg de Fe_2O_3 par CRAPAL et par an, la partie continue représentant 26,4 mg. Seul donc environ la moitié de celle-ci peut être attribuée à une éventuelle contribution cosmique dans le cadre de l'hypothèse dans laquelle nous nous sommes placés, ce qui nous conduit à une contribution cosmique équivalente à :

$$20,4 \text{ mg Fe}_2\text{O}_3 \text{ par CRAPAL et par an.}$$

Donc selon que nous choisissons l'une ou l'autre des hypothèses, nous arrivons à une retombée de poussière représentant une attraction magnétique équivalente à 4 ou 20 mg Fe_2O_3 par CRAPAL et par an.

Nous n'avons que trop peu d'éléments pour nous permettre de choisir entre l'une ou l'autre hypothèse, cependant il faut tenir compte du fait que, dans les hypothèses considérées, nous n'avons étudié que les relations de la poussière détectée avec soit les produits de la stratosphère, soit les périodes de l'année,

mais qu'en aucun cas nous n'avons pu établir indiscutablement l'origine cosmique de cette poussière. Il nous semble préférable actuellement d'utiliser le rapport flux variable/flux constant compatible avec les estimations de P. MILLMAN et Mac INTOSH qui nous donne la valeur de

20,4 mg $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$ par CRAPAL et par an

2° Conversion des valeurs d'attraction magnétique en poids de poussière

Pour passer des valeurs de l'attraction magnétique à un poids de poussière, nous devons choisir un coefficient d'aimantation magnétique.

Au début de cette étude (1963) nous avons utilisé pour cette conversion des collections de poussières faites à Gif sur Yvette, mais il est apparu que cette poussière était très certainement contaminée par une cheminée voisine dont l'installation de dépoussiérage ne fonctionnait pas pendant certaines périodes de la nuit, toutefois, ces échantillons présentaient l'avantage d'un poids relativement important. Cependant, malgré les erreurs que l'on peut faire sur l'estimation du poids, il semble préférable de s'adresser, comme échantillon de référence, à des poussières collectées par des ballons stratosphériques.

Nous avons vu que même avec l'utilisation d'un échantillon de normalisation stratosphérique nous aboutissions à des valeurs différentes selon que l'on utilisait les valeurs des mesures magnétiques ou celles des dosages chimiques.

Nous nous trouvons donc finalement avec 4 possibilités correspondant aux deux hypothèses mentionnées, et aux deux méthodes de mesure pour chacune d'elle.

Les résultats possibles sont donc :

Hypothèse de pic unique 7,25 mg $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$	dosage chimique $6,4.10^7$ tonnes/terre-an	mesure magnétique seule $3,2.10^8$ tonnes/terre-an
Hypothèse du rapport de partie variable et partie continue identique aux météores	$1,6.10^8$ tonnes/terre-an	$8,0.10^8$ tonnes/terre-an
20,4 mg $\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$		

Chapitre 5

LES PRELEVEMENTS EN ALTITUDE

Malgré toutes les études qui ont été faites sur la poussière cosmique, on n'en connaît toujours pas les caractéristiques principales, on ne sait pas si la poussière cosmique est composée uniquement de sphérules, ni quelles sont les dimensions minimales de ces poussières. Il est évident que, dans ces conditions, une collection de poussières dans l'atmosphère peut être une étape importante dans l'identification de ces particules qui doivent y être en majorité d'origine cosmique. Toutefois, il faut noter que l'érosion éolienne des continents peut entraîner des produits d'origine terrestre très haut dans l'atmosphère et très loin de leur lieu d'origine, mais les études sur la circulation atmosphérique ont beaucoup progressé et il est possible maintenant d'évaluer des temps de séjour pour la poussière dans les différentes couches de l'atmosphère, et, partant de ces estimations, de juger si les poussières que l'on peut obtenir par collection directe sont d'origine terrestre ou extraterrestre.

Toutefois, les méthodes de collection aérienne que nous avons actuellement à notre disposition présentent certains inconvénients. Il est entre autres, très difficile, comme nous le verrons, d'évaluer exactement les quantités de poussières.

COLLECTION SUR DES GAZES CHIRURGICALES

Les techniques de filtration d'air sur des gazes chirurgicales ont l'avantage de rassembler de grandes quantités de poussières, l'importance des pollutions pendant les expériences devient moins critique.

Dans une première série de mesures nous avons utilisé la méthode suivante : à l'aide d'un ballon météorologique, on monte un cadre sur lequel se trouve tendue une gaze. Le passage de l'air à travers cette gaze se fait uniquement sous l'effet de la pression dynamique pendant la montée et la descente du ballon. La vitesse de montée et de descente du ballon est de l'ordre de 350 mètres par minute. Le volume d'air filtré est donc l'ensemble du volume balayé par le cadre supportant la gaze. On arrive par ce moyen, pour chaque prélèvement, à des volumes considérables, de l'ordre de 5 000 m³.

L'efficacité de filtration de la gaze pour la poussière a été déterminée par comparaison avec les résultats obtenus par les aspirateurs munis de filtres absolus, elle est égale à 5 % (figure 18).

Dans une deuxième série d'expériences, nous avons voulu éviter totalement la collection de poussières dans les basses couches de l'atmosphère ainsi que

pendant la descente de l'appareil. Ceci nous a conduit à utiliser le dispositif suivant :

La gaze est tendue sur un cadre qui se trouve à l'intérieur d'une boîte en carton fermée par une ficelle de nylon. Une mèche en amadou est allumée au moment du départ de la boîte. La longueur de cette mèche est calculée de telle sorte que, lorsque le ballon atteint la limite inférieure de la zone dans laquelle on veut recueillir les poussières, elle brûle la ficelle de nylon qui maintient la boîte fermée. Les panneaux supérieurs et inférieurs de la boîte s'ouvrent et l'air s'engouffre alors dans la boîte et est filtré sur la gaze chirurgicale. Pour contrôler l'altitude d'ouverture de la boîte, en même temps que celle-ci s'ouvre, un réflecteur radar supplémentaire est libéré de telle sorte que le signal de retour du radar qui suit l'ascension du ballon se trouve dédoublé. A l'arrivée à l'altitude maximale de prélèvement, le ballon porteur en caoutchouc éclate et l'ensemble boîte, réflecteur radar et parachute retombe. Les panneaux de la boîte de carton sont conçus de telle manière qu'ils se referment dès que le mouvement de descente est amorcé. Ainsi le prélèvement ne se fait que pendant la montée, et, de plus, la boîte tombant au sol fermée, la gaze est protégée contre une pollution éventuelle jusqu'au moment du ramassage. Une boîte témoin, comprenant une gaze tendue, a été lancée sans mécanisme d'ouverture et n'a effectivement montré aucune augmentation de poids ou de magnétisme de la gaze.

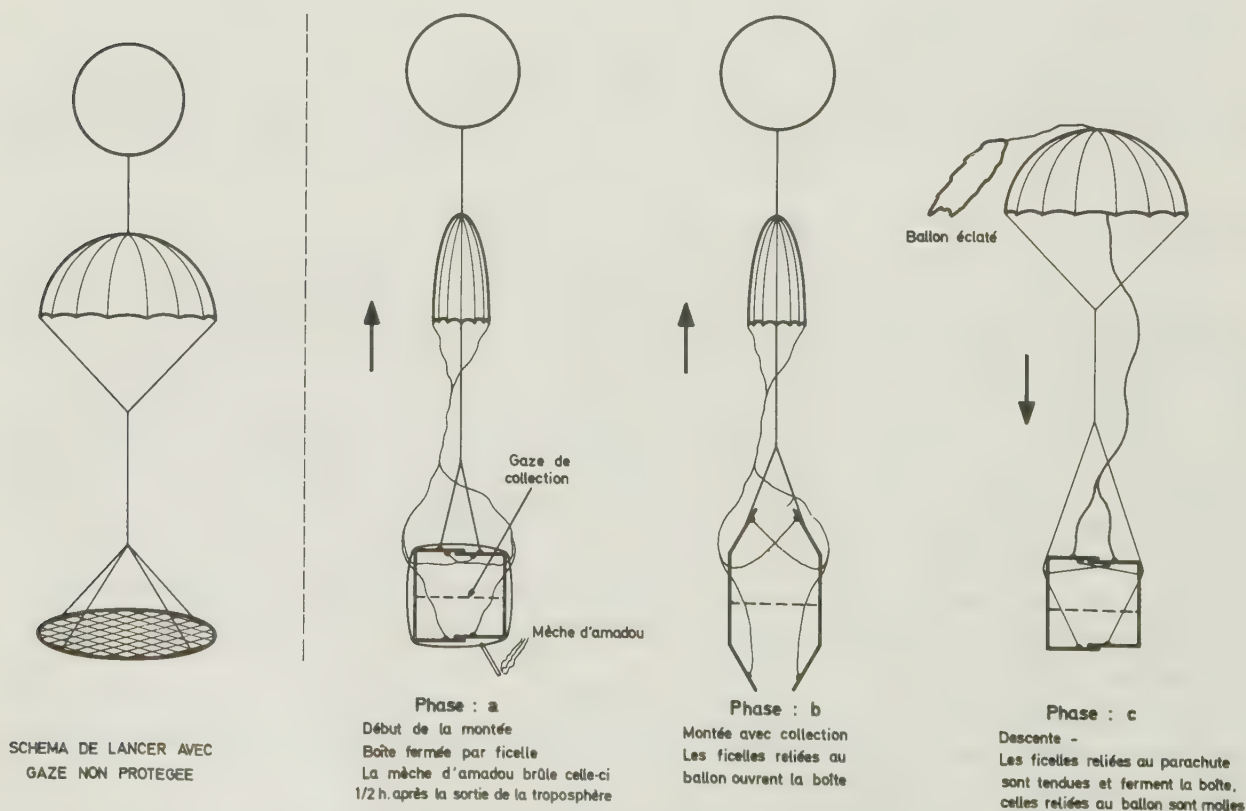


Figure 18 - Schéma de lancer avec gaze dans la boîte de protection.

Un autre facteur peut introduire des erreurs systématiques dans cette sorte de sondes : au début des expériences, pour des raisons de commodité, tous les sondages étaient faits par beau temps. Or, si la poussière cosmique a une influence sur la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, comme cela a été suggéré par BOWEN (1963), le fait de n'effectuer des sondages que par beau temps amène à mesurer systématiquement une concentration de poussières plus faible que celle qui doit normalement exister.

C'est pourquoi, dans une dernière série d'expérience effectuée avec ces boîtes et destinée à suivre au jour le jour les modifications de concentration de la poussière cosmique, nous avons dû mettre au point une méthode de lancer des ballons porteurs des collecteurs qui permettaient d'effectuer ces lancers par tous les temps, quelle que soit la vitesse du vent au sol et qu'il pleuve ou non.

L'appareil de collection à lancer était attaché d'une part au ballon porteur et d'autre part à une ficelle elle-même amarrée en amont du vent au sol, ce qui fait que au lieu d'être traîné latéralement par un ballon libre, l'ensemble de collection se trouvait attaché à un ballon "captif", au moins pendant le début de sa montée et la charge à enlever était arrachée du sol à la verticale. Ce n'est que quand elle avait pris une certaine altitude, jugée suffisante et dépendant des conditions météorologiques, que la ficelle qui maintient le ballon captif était progressivement lâchée. Avec ce système permettant de lancer par tous les temps, on a donc pu se libérer totalement des conditions météorologiques locales.

Le tableau 4 résume les principaux résultats obtenus avec les gazes chirurgicales dans les prélèvements stratosphériques.

INTERPRETATION DES RESULTATS

Nous avons vu précédemment que la série de mesures à l'aide des gazes protégées avait été effectuée pendant l'averse des Léonides, en 1965, à cette époque, cette averse devait être particulièrement importante car les Léonides sont reliées à la comète Temple Tutte, et bien que cette averse puisse être notée tous les ans, elle est spécialement importante tous les 33 ans.

Par conséquent, si dans ce cas nous trouvons des valeurs beaucoup plus élevées que dans l'ensemble des autres prélèvements ceci s'explique aisément. L'accroissement des concentrations en poussières a été tel que, en plus des mesures magnétiques nous avons pu effectuer des pesées directes des cendres des gazes de prélèvement.

Nous allons donc étudier séparément cet ensemble de résultats car il semble difficile de l'inclure dans une estimation moyenne de la quantité de poussières arrivant sur Terre.

Le tableau 4 donnant les résultats de cette série de prélèvements montre :

1° - La concentration de poussières magnétiques et de fer élément, accuse un accroissement important dans la deuxième moitié de novembre. En effet, la concentration détectée le 20 novembre 1965 équivalente à 15.10^{-6} g. $Fe_2O_3\gamma$ par mètre cube, est 8,4 fois supérieure aux concentrations moyennes déjà citées, trouvées lors de sondages antérieurs par GRJEBINE et LAMBERT (1965) (1967).

2° - La concentration de poussières magnétiques dans la stratosphère était le 20 novembre 1965, très supérieure à la concentration de l'air au niveau du sol,

Tableau 4

Résultats des prélèvements sur gazes sans système d'ouverture :

Date	Altitude en mètres	d.p.m./m ³ local	Magnétisme en équivalent à 9 Fe ₂ O ₃ γ/m ³ local
31/10/61	0 - 24 400	8,8	0,76 10 ⁻⁶
31/01/62	0 - 9 500	6,1	1,5 10 ⁻⁶
10/05/62	0 - 7 600	2,8	1,5 10 ⁻⁶
29/05/62	0 - 10 400	3,3	0,76 10 ⁻⁶
4/06/62	0 - 10 600	0,44	1,5 10 ⁻⁶
12/06/62	0 - 12 300	2,0	2,2 11 ⁻⁶
18/06/62	0 - 27 700	3,1	0,68 10 ⁻⁶
9/10/62	0 - 33 200	22,0	2,2 10 ⁻⁶

Résultats des prélèvements sur gazes protégées :

Date	Altitude balayée en mètres	Radioactivité d.p.m./m ³ local	Magnétisme en équivalent 8 Fe ₂ O ₃ γ/m ³	Accroissement des poids des cendres
11/11/65	0 - 18 000	1,70	0,8 10 ⁻⁶	négatif
19/11/65	9 000 - 28 000	0,52	1,9 10 ⁻⁶	négatif
20/11/65	6 000 - 30 000	0,23	15,0 10 ⁻⁶	1,0 10 ⁻⁴
22/11/65	12 000 - 31 000	1,00	6,4 10 ⁻⁶	négatif
24/11/65	10 000 - 30 000	0,60	15,0 10 ⁻⁶	2,4 10 ⁻⁴
25/11/65	12 000 - 30 000	0,77	6,4 10 ⁻⁶	1,28 10 ⁻⁴

qui, à Gif sur Yvette, était 0,23.10⁻⁶ g Fe₂O₃γ par mètre cube à la même époque. Après des injections récentes de produits radioactifs dans la stratosphère C. JEHANNO et J. LABEYRIE (1959) avaient montré avec des prélèvements faits avec des aspirateurs, que dans la stratosphère il pouvait y avoir des enrichissements de poussières et notamment que l'accroissement par rapport au sol pouvait atteindre un facteur 22, des gazes chirurgicales non protégées employées pour l'étude de la radioactivité par G. LAMBERT et que nous avons mesurées montraient de la même manière un accroissement de la concentration par rapport au sol d'un facteur 7.

Après l'averse des Léonides, l'accroissement par rapport à la concentration en poussières magnétiques au sol, à Gif sur Yvette, atteint un facteur 60, mais cette augmentation apparaît très irrégulière. En effet, elle est apparue équivalente à (en g/m³ de Fe₂O₃γ) : 0,8.10⁻⁶ le 11 novembre, 1,9.10⁻⁶ le 19 novembre, 15,0.10⁻⁶

le 20 novembre, $6,4 \cdot 10^{-6}$ le 22 novembre, $15,0 \cdot 10^{-6}$ le 24 novembre et $6,4 \cdot 10^{-6}$ le 25 novembre (figures 19 et 20).

3° - Le facteur 60 entre la concentration en poussières magnétiques dans la stratosphère et au voisinage du sol rend extrêmement improbables les risques de pollution, soit de la gaze, soit de la stratosphère elle-même par des nuages de poussières venus du sol.

4° - L'accroissement de concentrations en poussières magnétiques s'est traduit également par un accroissement général du poids des cendres des gazes de collection, alors que, normalement on assiste à une perte de matière due aux techniques de laboratoire, transvasement, etc... ; pour les vols des 20, 24 et 28 novembre 1965, on a constaté une augmentation du poids des cendres recueillies comparé à celui des cendres témoins. Le poids des poussières collectées est respectivement 1,0 , 2,4 et $1,2 \cdot 10^{-4}$ g/m³.

5° - Les concentrations en fer, dosé chimiquement, suivent la même courbe que celle du fer dosé magnétiquement. On a trouvé respectivement 0,32 , 0,18 , 3,4 , 2,1 , 2,5 et $1,8 \cdot 10^{-6}$ g de fer par mètre cube. Il faut noter toutefois que le rapport magnétisme/fer élément n'est pas constant et passe de 2,5 le 11 novembre à 10,5 le 19 novembre pour décroître ensuite. Ceci peut s'expliquer de deux façons. Les dosages sur des microquantités de poussières où une partie du fer se trouve dans des masses de silicates, présentent forcément des aléas. Il n'y a aucune raison d'autre part, que ce rapport soit constant. Mesuré au sol il est voisin de 1. La brusque remontée de ce rapport lors de l'averse suivie d'une baisse fait penser que l'oxydation d'une partie du fer métal introduit commence dans l'atmosphère même et que ce processus amène une chute du magnétisme spécifique.

En conclusion, il semble que la teneur de la stratosphère en poussière ferromagnétique :

1 - est très variable,

2 - qu'elle a été très fortement augmentée à la suite de l'averse des Léonides de novembre 1965.

L'augmentation des concentrations de poussières dans la stratosphère a été confirmée également par des comptages directs de poussières. ROSEN (1964) a envoyé jusque dans la stratosphère un appareillage complexe qui comptait les poussières contenues dans un élément de volume. L'appareil consistait en un microscope qui regardait sur un fond noir un courant d'air volumétriquement déterminé. Quand une poussière passait devant l'objectif du microscope, son illumination latérale permettait sa détection par un photomultiplicateur placé derrière l'objectif du microscope. ROSEN a observé exactement la même répartition que nous, avec un net accroissement au-dessus de la tropopause (figure 21).

Ce type de distribution ne peut exister qu'avec deux hypothèses sur l'origine de la poussière :

a) les poussières collectées sont extra-terrestres,

b) les poussières collectées sont terrestres mais sont introduites dans la stratosphère à haute altitude uniquement pendant quelques événements rares et très violents.

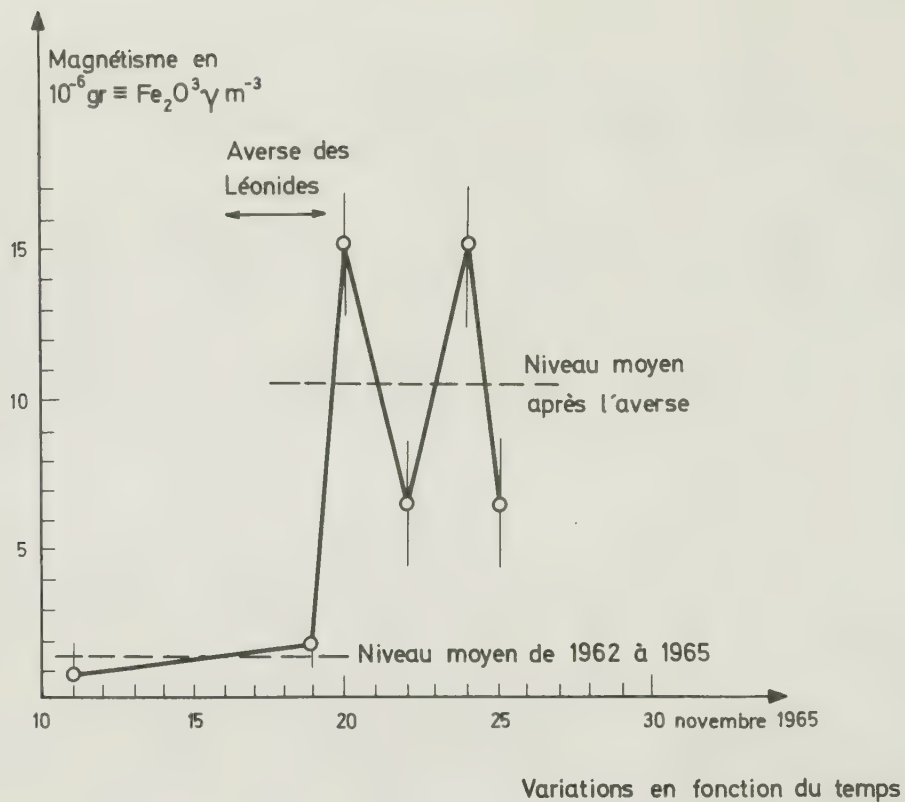


Figure 19 - Prélèvements stratosphériques à l'aide de gazes protégées.

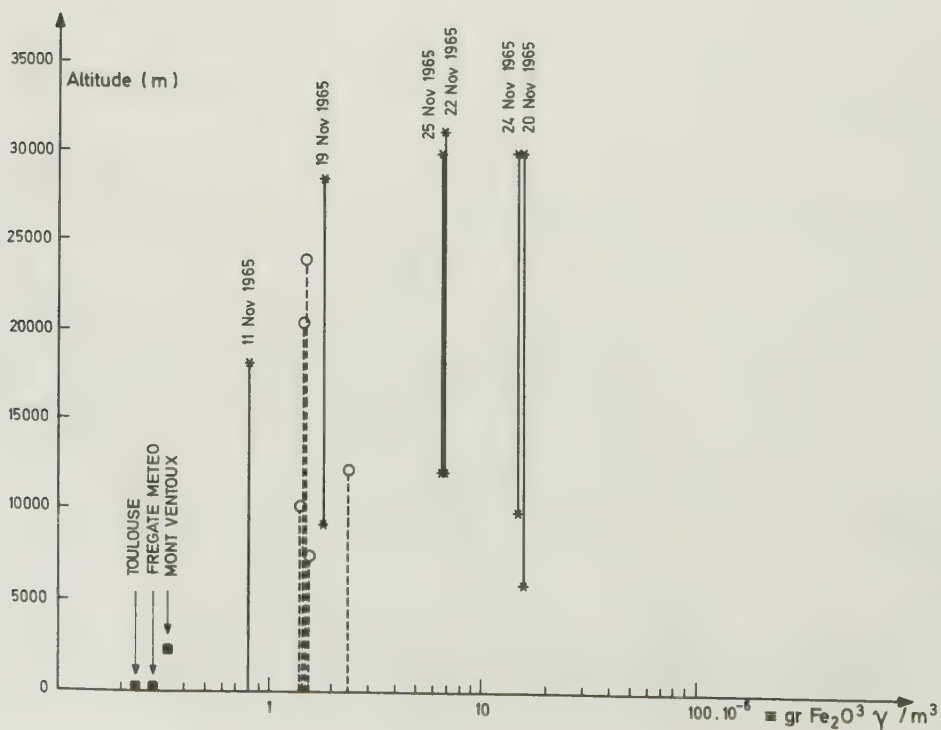


Figure 20 - Prélèvements stratosphériques avec gazes protégées en fonction de l'altitude.

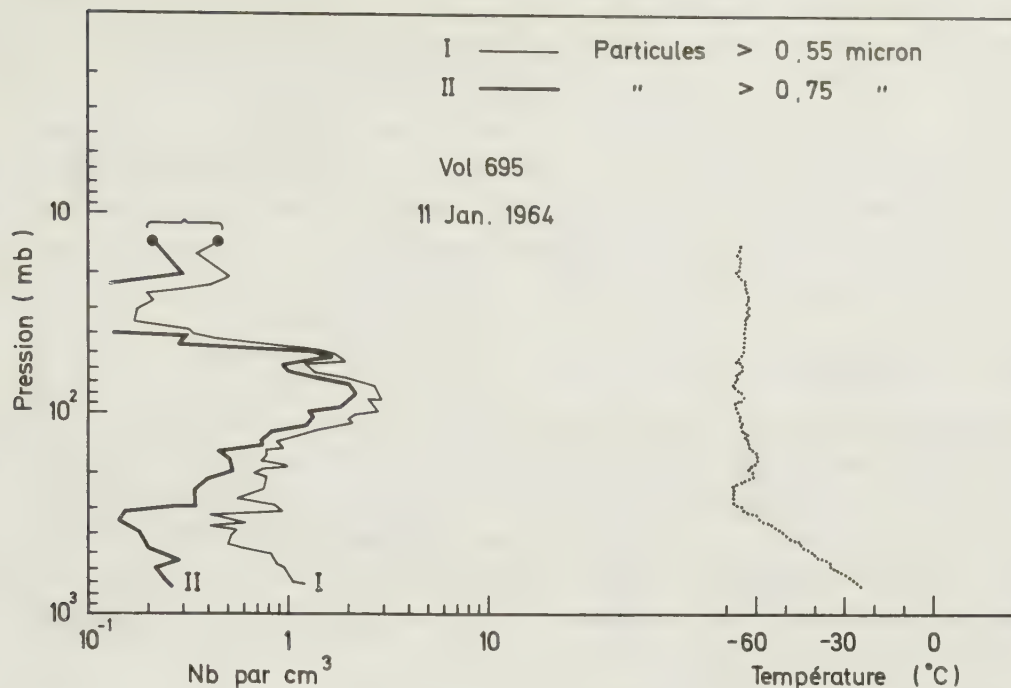


Figure 21 - Distribution verticale de poussière d'après ROSEN.

a) - Origine extra-terrestre

La concentration aux différentes altitudes suit les lois de la compressibilité de l'air et des nettoyages qui existent aux différentes altitudes. Partant du haut, la concentration augmente jusqu'aux altitudes de 25 à 20 kilomètres, la densité plus grande de l'air offrant un meilleur support et le système des vents stratosphériques les isole de la troposphère. Passé la tropopause elles sont reprises dans des zones où la teneur en eau augmente, elles servent de noyau de condensation à cette eau et la vitesse de précipitation au sol augmente considérablement. Ainsi les poussières suivent exactement les mêmes lois de concentration que les aérosols radioactifs. Dans les derniers kilomètres au-dessus du sol la comparaison entre les teneurs en poussière dans l'air et les quantités de poussières collectées par un collecteur à retombées radioactives CRAPAL fournit, par exemple, les mêmes valeurs de vitesse de chute : environ $1,5 \pm 0,3$ km/jour. La distribution des poussières telle qu'elle est détectée milite donc pour leur origine extra-terrestre.

b) - Origine terrestre

Une éventualité d'origine terrestre donnant les mêmes répartitions n'est cependant pas incompatible avec la distribution observée. Cependant on est à peu près forcé alors d'imaginer des processus d'injection rapides et violents, comparables par exemple, aux bombes atomiques pour les produits radioactifs. Si la concentration des poussières était le fait d'une érosion éolienne permanente, on devrait s'attendre à des densités croissantes dans la stroposphère au voisinage du sol et en aucun cas aux courbes obtenues par ROSEN pour ne citer que ces expériences où l'enregistrement en continu exclut toute autre interprétation.

Reste à imaginer, pour rendre une hypothèse terrestre plausible, soit :

1° - une injection essentiellement équatoriale avec transport vers les pôles et retombé dans les zones tempérées pendant ce transport ;

2° - ou encore un système d'injection volcanique, ce cas est exclu par la chronologie des éruptions volcaniques et de nos mesures, ou bien à une injection ayant lieu pendant des tempêtes de sable particulièrement violentes. Là encore on ne peut pas estimer que les renseignements météorologiques que nous avons soutiennent particulièrement bien cette dernière hypothèse.

EXPLOITATION DES RESULTATS

Les mesures stratosphériques donnent une meilleure connaissance des qualités de la poussière et permettent donc une exploitation plus valable des renseignements recueillis au sol. Ainsi les relations entre la masse, le magnétisme, les quantités de fer dosables chimiquement, la radioactivité due aux bombes peuvent donner lieu à plusieurs types d'évaluation, ou bien encore, la connaissance de leur concentration stratosphérique peut être utilisée directement associée à une vitesse de chute pour fournir une nouvelle évaluation.

1° - Relation entre masse et magnétisme

Dans le chapitre traitant des collections au sol, nous avons vu que la conversion de retombées magnétiques moyennes en retombées gravifiques impliquait le choix d'un échantillon type. Si celui-ci est fourni par les collectes en ballons stratosphériques, les retombées au sol deviennent : 8.10^8 tonnes par an.

2° - Relations magnétisme/quantité de fer dosable chimiquement

A l'occasion d'une précédente étude (GRJEBINE et HOANG CHI TRACH (1967)) nous avons vu que plutôt que d'établir une correspondance magnétisme/poids qui était sujette à d'importantes erreurs en raison des faibles quantités de poussière stratosphérique recueillies et donc de la difficulté de les peser, on pouvait tenter d'établir une correspondance en utilisant le dosage chimique du fer puis en supposant une teneur en fer pour les poussières cosmiques analogues à celle de la croûte terrestre (5 %) et passer ainsi à une masse globale de poussière. Les évaluations de retombées magnétiques qui ont donné :

$1,95 \text{ mg Fe}_2\text{O}_3\gamma/\text{CRAPAL/mois}$ donnent $3,2.10^8$ tonnes/Terre-an.

l'évaluation de la contribution cosmique à $20,4 \text{ mg Fe}_2\text{O}_3\gamma$ par m^2/an donnerait $1,7 \text{ mg Fe}_2\text{O}_3\gamma/\text{Crapal mois}$, et donnerait $2,8.10^8$ Tonne/Terre-an.

3° - Relations radioactivité/masse

Même si l'on suppose que les débris radioactifs des bombes et les poussières cosmiques ne sont pas directement liés, et que les variations pourraient exister à la suite de chutes privilégiées des unes ou des autres, il est difficile de penser que le comportement moyen n'est pas voisin et que, pondérées sur l'année, les unes et les autres ont des vitesses de chute voisines.

Dans ce cas, en établissant un rapport de concentration dans la stratosphère entre les débris radioactifs et la quantité de poussière cosmique et en utilisant ce rapport pour convertir l'ensemble des informations recueillies par le réseau des

collecteurs de retombée radioactive, on peut disposer d'une méthode d'évaluation de la masse accrétée qui présente beaucoup de garanties.

Ainsi, les sondages de novembre 1965 ont donné une radioactivité moyenne :

$$\bar{P}/m^3 = 0,80 \text{ dpm} \quad (\text{tableau 5})$$

et un poids moyen de poussière :

$$\bar{P}/m^3 = 1,56 \cdot 10^{-4} \text{ g}/m^3$$

soit donc :

$$\frac{\text{Poids}/m^3}{\text{Radioactivité}/m^3} = k = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ g/dpm}$$

Pendant cette période, les retombées radioactives en France et outre-mer détectées par le réseau CRAPAL ont été :

Radioactivité au sol par mois	France	: 4,9 .10 ³ dpm/m ²
	Outre-mer	: 1,91.10 ³ dpm/m ²
	Ensemble du réseau	: 3,68.10 ³ dpm/m ²

Ce qui donne en poids/m²-an :

France	: 11,4 g/m ² -an
Outre-mer	: 4,45 g/m ² -an
Ensemble du réseau	: 8,6 g/m ² /an

Converti à la surface totale de la Terre, le chiffre de 8,6 g/m²-an donnerait :

$$4,3 \cdot 10^9 \text{ tonnes/Terre-an} \quad (\text{pendant les Léonides})$$

Avec niveau supposé normal : 5,1.10⁸ tonnes/Terre-an.

Cependant, les chiffres de concentrations stratosphériques de poussière utilisés sont ceux qui ont été obtenus après une averse météoritique, le niveau antérieur à l'averse était 8,4 fois inférieur ce qui nous conduit à une valeur de

$$5,1 \cdot 10^8 \text{ tonnes/Terre-an} \quad (\text{avec niveau supposé normal}).$$

4° - Relations radioactivité/fer chimique

Si au lieu des valeurs pondérales des poussières on utilise comme précédemment les valeurs données par l'analyse chimique du fer en supposant ensuite une teneur en fer égale à 5 % analogue à la teneur en fer de la croûte terrestre, et qu'on établit le rapport radioactivité sur fer chimique, on obtient :

$$\begin{aligned} \text{Radioactivité moyenne}/m^3 &= 0,80 \text{ dpm} \\ \text{Teneur moyenne en fer}/m^3 &= 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ g}/m^3 \end{aligned}$$

d'où : $k' = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ g/dpm}.$

En utilisant pour la radioactivité les mêmes valeurs que dans le paragraphe précédent, on obtient :

Poids moyen au sol, en France	: 0,032 g/m ²
Poids moyen au sol, Outre-mer	: 0,0124 g/m ²
Poids moyen au sol, pour l'ensemble du réseau	: 0,024 g/m ²

La valeur trouvée pour l'ensemble du réseau nous conduit donc à :

$1,4.10^8$ tonnes/Terre-an (pendant les Léonides).

Cependant, comme dans l'estimation précédente, nous devons tenir compte du facteur 8,4 qui existe entre les valeurs mesurées pendant l'averse des Léonides qui nous ont servi à notre estimation et les valeurs trouvées avant et après l'averse, cette évaluation devient :

$1,7.10^7$ tonnes/Terre-an.

1 Date du vol	2 Zone de prélèvement	3 Radioactivité dpm/m ³ d'air local	4 Accroissement de poids des cendres des gazes/m ³ d'air local	5 Accroissement de magnétisme des cendres exprimé en équivalent Fe ₂ O ₃ γ/m ³	6 Accroissement du fer (dosage chi- mique) g/m ³	7 Rapport γ colonne 5 colonne 6
11 nov. 65	Aller ouvert 0 - 18 km Retour ouvert 18 - 0 km	1,70	ΔP négatif	$0,8.10^{-6}$	$0,32.10^{-6}$	2,5
19 nov. 65	Aller ouvert 0 - 28 km Retour fermé	0,52	ΔP négatif	$1,9.10^{-6}$	$0,18.10^{-6}$	10,5
20 nov. 65	Aller ouvert 6 - 30 km Retour fermé	0,23	$1,0.10^{-4}$	$15,0.10^{-6}$	$3,4 .10^{-6}$	4,4
22 nov. 65	Aller ouvert 12 - 31 km Retour fermé	1,00	ΔP négatif	$6,4.10^{-6}$	$2,1.10^{-6}$	3,05
24 nov. 65	Aller ouvert 10 - 30 km Retour fermé	0,60	$2,4.10^{-4}$	$15,0.10^{-6}$	$2,5.10^{-6}$	6
25 nov. 65	Aller ouvert 12 - 30 km Retour fermé	0,77	$1,28.10^{-4}$	$6,4.10^{-6}$	$1,85.10^{-6}$	3,5
Vol témoin 13 nov. 65	Boîte fermée 0 - 32 km 32 - 0 km	0,001	ΔP négatif	Δ magnétisme négatif	0	

Tableau 5

Comparaison des méthodes utilisant les divers rapports

Le tableau 6 donne les quatre estimations que nous avons obtenues en utilisant les divers rapports qui peuvent lier le poids de poussière recueillie, la radioactivité, le magnétisme et les dosages chimiques du fer des poussières.

Tableau 6

	Magnétisme	Radioactivité
Poids	8.10^8 tonnes/terre-an	$5,1.10^8$ tonnes/Terre-an
Chimie	$2,8.10^8$ tonnes/Terre-an	$1,7.10^7$ tonnes/Terre-an

Les méthodes utilisant le magnétisme donnent des résultats plus forts que les méthodes utilisant la radioactivité. Il est possible que dans l'évaluation du magnétisme des poussières collectées au sol, il y ait une contribution locale due à l'érosion éolienne 1,5 à 18 fois plus importante qu'une éventuelle reprise par le vent de poussières radioactives déposées sur le sol. Si nous supposons que les produits radioactifs qui tombent sur le sol ne sont pas du tout repris par le vent et que les collecteurs par conséquent ne collectent que les produits radioactifs qui tombent, supposition qui est très généralement faite par les chercheurs qui étudient les retombées radioactives, nous sommes obligés d'admettre qu'une fraction du sol cependant, contenant entre autres des substances magnétiques est reprise par l'érosion éolienne et est, au moins, 1,5 fois plus importante que la retombée directe.

Ce chiffre a une très grande importance car, non seulement il nous servira à pondérer les estimations faites sur les retombées au sol, mais encore, il rend invraisemblable l'hypothèse selon laquelle les retombées radioactives ne subissent pas, elles-aussi, une certaine érosion. Par conséquent, il semble que nous détectons systématiquement une radioactivité dans les collecteurs plus élevée que la radioactivité réelle de la retombée, malheureusement, nous n'avons pas encore de moyen pour évaluer la reprise par le vent.

Il faut aussi remarquer que, même si l'on utilise pour la conversion des teneurs en fer en poids de poussière une teneur en fer des poussières cosmiques plus grande que celle de la croûte terrestre, par exemple la teneur en fer de la Lune ou celle des chondrites, les chiffres donnés par l'évaluation chimique deviendront encore plus faibles que ceux donnés par la mesure pondérale. Pour obtenir une bonne correspondance entre les deux valeurs, il serait nécessaire d'imaginer qu'une poussière comme celle qui a été détectée en novembre 1965 contiendrait très peu de fer et appartiendrait à une classe spatiale qui serait encore plus silicatée que les tectites. Nous verrons par la suite que les analyses de sphérules n'appuient aucune-ment cette hypothèse.

5° - Une cinquième méthode peut nous aider à choisir entre ces différents résultats :

Nous avons vu que la teneur en fer, détectée lors de la dernière série de sondages était en moyenne :

$0,26.10^{-6}$ grammes de fer/m³

et que, en supposant pour cette poussière une teneur en fer analogue à celle de la croûte terrestre, on obtenait :

$5,2.10^{-6}$ grammes de poussière/m³.

Nos expériences avec les gazes ne nous permettent pas de savoir si cette teneur est constante jusqu'au sol, toutefois, les informations données par les aspirateurs ainsi que les expériences de comptage de particules effectuées par ROSEN (1964) indiquent qu'il s'agit probablement uniquement d'une couche très riche située au-dessus de la tropopause, entre 15 et 20 kilomètres d'altitude. La surface de la Terre étant 5.10^{14} mètres carrés, cette couche contient :

$1,04.10^7$ tonnes de poussières

1 - Après la chute de la comète de la Tunguska, les observations d'astronomie ont observé une nébulosité anormale du ciel pendant 2 mois.

2 - Les mesures de nombres de sphérules faites par CROZIER (1962) présentent des pics dont la montée est rapide, correspondant à une averse de météores, et dont la descente est de l'ordre de grandeur de 15 jours à 1 mois.

Chapitre 6

COLLECTION DE RETOMBÉES DANS L'ANTARCTIQUE

Une des idées les plus simples pour tenter d'évaluer la masse de poussière collectée par la Terre consiste à récolter dans des endroits "propres" toute la poussière qui tombe par unité de surface. Par endroit "propres" nous entendons une zone idéale où il n'y aurait ni apport de poussières industrielles, ni apport éolien de poussière terrestre.

Comme la poussière cosmique arrivant dans la haute atmosphère subit les mouvements de celle-ci, il est bien évident que seule une valeur moyenne évaluée au moins sur l'année pour la retombée peut être représentative. Il n'est donc pas suffisant que la région choisie ne reçoive pas de retombée industrielle ou terrestre pendant un certain temps ; il faut que ces conditions soient réalisées pendant de longues périodes.

De telles conditions semblent approchées, mieux qu'ailleurs, dans les régions polaires.

1 - DESCRIPTION DE LA BASE

La carte (figure 22) donne la position géographique et la localisation de la station de collection.

La station Dumont d'Urville a été installée dans l'île des Petrels en 1952-1953.

Cette île est située à cinq kilomètres de la côte du continent antarctique et à un kilomètre de la langue glaciaire flottante du glacier de l'Astrolabe.

La situation géographique de l'île est $66^{\circ}40'$ de latitude Sud et 140° de longitude Est. Ce point se trouve à environ 150 kilomètres du pôle magnétique Sud.

L'île des Pétrels, longue de 700 mètres et large de 400 mètres, est l'îlot le plus important d'un archipel qui s'étend sur une quinzaine de kilomètres et est orienté Nord Sud, 15 Est Ouest.

Ces îlots de l'archipel, en majeure partie libres de glace, constituent, avec trois très petits "nunataks" (pointes émergeant de la glace) et une moraine la totalité des surfaces rocheuses existant dans un vaste périmètre. La surface rocheuse de l'archipel est de l'ordre du kilomètre carré, et, hormis des blocs erratiques (grès, granit, etc...) est à peu près exclusivement constituée de gneiss. Il n'y a pas de terre "végétale" et seulement de très faibles quantités de sable sur ces îlots. La végétation est quasi inexistante (lichens), par contre on y trouve d'assez importantes quantités de guano aux emplacements des nombreuses colonies de manchots "Adélie".

BASE DUMONT D'URVILLE - INSTALLATIONS AU 1er MARS 1970

Bâtiments et abris (en noir sur la carte)

- 1 - Base Marret
- 2 - Abris accessoires hélicoptère
- 3 - Bâtiment d'habitation
- 4 - Entrepôt, atelier mécanique
- 5 - Ancien garage
- 9 - Abris légumes
- 10 - Abris magnétisme (La Cour)
- 11 - Abris magnétisme
- 12 - Abris magnétisme (mesures absolues)
- 13 - Abris pompe gas-oil
- 14 - Abris outillage débarquement
- 15 - Abris vivres
- 16 - Abris CEA
- 17 - Abris magnétisme (mesures absolues)
- 19 - Abris pompe à gas-oil
- 20 - Abris équipements et habillement
- 22 - Garage, menuiserie, électricité
- 23 - Cave séismologique
- 24 - Centrale électrique
- 25 - Bâtiment laboratoire n° 1
- 26 - Bâtiment laboratoire n° 2
- 27 - Chambre froide
- 28 - Shelter eau campagne d'été
- 29 - Shelter amagnétique
- 30 - Abris de lancement des ballons sondes
- 31 - Bâtiment séjour
- 32 - Bâtiment logement d'été
- 33 - Hall de montage fusées
- 34 - Shelter ionosphère - émetteurs
- 35 - " " - riomètres
- 36 - " " - absorption
- 37 - Shelter pompage eau de mer
- 38 - Abris biologie
- 39 - Abris maintenance ionosonde
- 40 - Radome radar météo
- 41 - Bâtiment laboratoire n° 3
(Rayco-Radioactivité)
- 42 - Bâtiment logement hivernage
- 43 - Shelter photomètre PHD

Constructions diverses (en noir sur la carte)

- C1 - Barre fluxmètre verticale
- C2 - Barres fluxmètres horizontales
- C3 - Voie ferrée du treuil
- C5 - Cuves gas-oil 2 m³
- C6 - Cuves gas-oil 8 m³
- C7 - Cuves gas-oil 50 m³
- C8 - Abris météo
- C9 - Antennes radio
- C10 - Antennes ionosphériques
- C11 - Riomètres
- C12 - Quai et portique de débarquement
- C13 - Plateforme hélicoptère
- C14 - Dépôt explosifs
- C15 - Blondin mobile
- C17 - Monorail vide-ordures
- C20 - Cuve eau douce 10 m³
- C22 - Canalisation d'adduction d'eau de mer
- C23 - Canalisation d'adduction d'eau douce
et de saumure
- C24 - Canalisation d'évacuation des eaux usées
- C27 - Radier hydrogène
- C28 - Frigorigraphe

Projets (en grisé sur la carte)

- P9 - Profil projet téléphérique
- P26 - Station radio

----- Limite rocher-glace

La numérotation est donnée dans l'ordre chronologique de construction. Les numéros manquants correspondent à des installations qui ont été supprimées

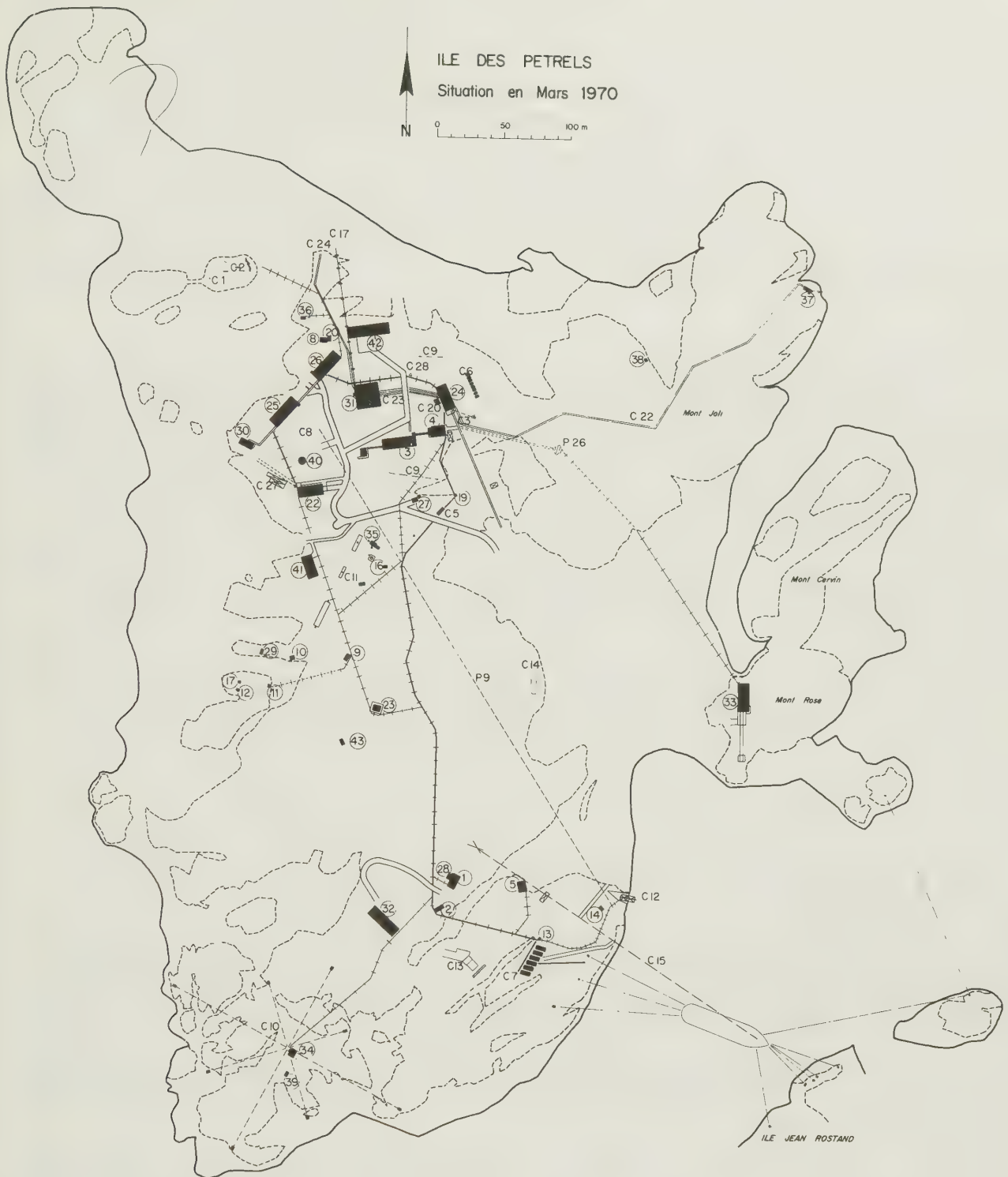


Figure 22

L'étude de la poussière dans la neige polaire semble exempte des critiques que l'on peut faire aux collecteurs.

- L'accumulation en cet endroit n'est perturbée par aucun facteur mécanique ni aucune surface ou piège artificiels.

- L'étude du névé sur de grandes profondeurs permet de s'affranchir du facteur temps de collection et d'intégrer les variations soit d'origine météorologique soit correspondant réellement à des variations du flux cosmique.

Deux méthodes d'étude sont possibles :

- Evaluation de toute la substance minérale contenue dans la neige, quelles que soient sa taille ou sa forme.

- Evaluation des insolubles, c'est-à-dire des particules séparables de l'eau de fusion, par une méthode mécanique.

II - METHODE GLOBALE

La méthode globale la plus simple est l'évaporation de l'eau de fusion de la neige, suivie d'une simple pesée du résidu. Il est nécessaire de connaître par ailleurs le taux d'accumulation de la neige dans la station de prélèvement, ce qui peut être fait très correctement, par exemple, par la méthode des balises.

Nous avons évaporé, dans un laboratoire sans poussière, sous l'action d'un épiradiateur, différents niveaux de névé provenant d'une carotte de la station A 5-3 (située à 4,6 km SW de la Pointe Géologie, 66°41 Sud, 139°55 Est).

Les résultats, pour ces différents niveaux sont donnés dans le tableau 7 :

Tableau 7

Niveau	Milligrammes/litre d'eau de fonte
925 cm - 937 cm	36,1
965 cm - 977 cm	42,0 (valeur moyenne)
977 cm - 995 cm	4,5 (17,4 mg/l)
995 cm - 1 005 cm	3,7

L'ensemble de ces résultats nous donne une valeur moyenne de 17,4 mg/kg. Nous verrons plus loin, par l'examen des particules insolubles dans la neige, que ce facteur 10 est fréquent, notamment au voisinage de 9,50 mètres à 10 mètres, où, sur une carotte voisine, un grand maximum a été enregistré.

Cette méthode globale, consistant à peser toutes les substances non volatiles, amène à intégrer, non seulement les poussières de toutes tailles, mais aussi toutes les composantes solubles.

Même si l'on suppose que toutes les poussières récoltées en Terre Adélie sont cosmiques ou stratosphériques, on ne peut faire une telle supposition pour la composante ionique qui, comme nous le verrons, présente des variations saisonnières liées manifestement à l'influence marine. Il faut donc introduire un facteur de correction que l'on obtient en dosant le chlorure de sodium dans la neige.

Nous avons dosé par spectrométrie optique le chlore et le sodium à la station A 3 (à 220 mètres d'altitude et 2,8 km de la Pointe Géologie située sur la côte).

Ces teneurs sont 3,5 mg/l pour le sodium et 2,2 mg/l pour le chlore, le rapport entre ces deux ions est donc différent de celui de l'eau de mer, il faut aussi remarquer que les autres ions, potassium et calcium ne sont pas non plus dans la neige, dans les mêmes proportions que dans l'eau de mer. Nous reviendrons plus loin sur ce phénomène.

En ce qui concerne la contribution des particules insolubles de l'eau de mer, nous avons vu qu'elle pouvait être considérée comme négligeable. En effet, la concentration dans l'eau de mer est 0,5 mg/kilo, et comme la salinité de la neige indiquée ci-dessus est inférieure d'un facteur mille à celle de la mer, cette contribution, dans la neige, devient inférieure à $0,5 \cdot 10^{-9}$ g/l.

Donc, après la correction nécessité par la composante ionique, la valeur moyenne des substances non volatiles est :

14,1 mg/kilo de névé.

L'évaporation d'une carotte entière, intégrant donc la retombée sur plus de trente ans pour la longueur de carotte que l'on obtient actuellement, fournirait probablement une valeur plus faible. En effet, un comptage direct des particules dans la neige, dont nous parlerons plus loin, a montré qu'au voisinage de 9 mètres de profondeur étudié ici par évaporation, le taux de retombée était relativement fort.

Le taux d'accumulation de la neige à la station A5 est très voisin de celui de la station A3.

A la station A5, par la méthode des balises, C. LORIUS et G. RICOU (1968) ont trouvé une valeur de l'ordre de 36 cm de névé par an. Par la stratigraphie, C. LORIUS (1968) trouve une valeur de 25,8 à 32,2 cm par an, et par la méthode du deutérium, 35,2 à 48,4 cm de névé par an. Des mesures par les méthodes radioactives ont donné une valeur sensiblement analogue (30 cm de névé par an, NEZAMI (1964).

Ceci nous donne donc :

$2,1 \text{ g/m}^2\text{-an}$

Critique de la méthode de pesée globale

Si l'on prend les précautions nécessaires lors de l'évaporation de la neige et si les dosages de chlore et de sodium sont faits pour tous les niveaux étudiés, la méthode de détermination par pesée globale présente peu d'inconvénients si ce ne sont les risques de pollution organique, vraisemblablement terrestre.

Pour évaluer la possibilité de cette pollution, nous avons dosé, par le permanganate de potassium la matière organique contenue dans la neige prélevée à l'emplacement de la carotte que nous avons étudiée.

Les résultats de ces analyses sont les suivants en ml équivalents de MnO_4K :

N°	ml MnO_4K (à froid)	N/1 000 par gramme de glace (à chaud)
1	0,10 ± 0,05	0,15 ± 0,05
2	0,10 ± 0,05	0,13 ± 0,05
3	0,10 ± 0,05	0,12 ± 0,05
4	0,11 ± 0,05	0,12 ± 0,05
5	0,10 ± 0,05	0,19 ± 0,05
6	0,07 ± 0,05	0,13 ± 0,05

La consommation de MnO_4K a été déterminée par colorimétrie, ces quantités représentent des concentrations en matière organique de l'ordre de 5 mg/kilo de glace s'il s'agit d'Alkane.

Cette source de pollution ne semble donc pas négligeable.

Dans le cas d'étude de carottes peu profondes, ce qui n'est pas entièrement le cas des échantillons étudiés ici, il ne peut y avoir de contamination par la remontée de moraine profonde.

Toutefois, si on suppose que dans les retombées d'origine stratosphérique une partie importante de la poussière n'est pas cosmique mais peut provenir d'une érosion éolienne lointaine, une étude plus détaillée devient nécessaire.

Dans nos échantillons, l'analyse à la microsonde électronique, sur laquelle nous reviendrons plus loin, nous a montré que sur 500 sphérules analysées dans cette carotte de névé, on ne trouve que deux ou trois cas de sphérules en silice présentant le même degré de pureté que le quartz, cependant, CAYEUX (1962) analysant une couche de poussière dans la glace, a montré la présence de quartz. L'échantillon étudié par CAYEUX avait été prélevé sur la glacier de l'Astrobale, c'est-à-dire à proximité du site de prélèvement des échantillons que nous avons étudiés ici, par conséquent, dans ce cas, le risque de pollution stratosphérique, ou de pollution par une érosion éolienne du continent antarctique même, n'est certainement pas nul.

On peut chercher, pour améliorer la précision de cette méthode à faire un triage du matériau en utilisant des propriétés physiques ou morphologiques particulières. Il semble aussi possible d'étudier la teneur globale de la poussière en un élément donné, les dosages chimiques donnant beaucoup plus de précision expérimentale que les pesées globales.

III - METHODES SEMI-GLOBALES

Les méthodes semi-globales ont déjà été employées par plusieurs auteurs pour estimer les quantités de retombées solides dans les neiges polaires.

A. MRKOS (1962) a prélevé et filtré 28 litres d'eau de neige à la station "Vostok". Il a ainsi obtenu 0,078 g de matière minérale, soit 2,78 mg/l.

L'analyse spectroscopique de cette matière minérale a montré qu'elle contenait une forte proportion de fer, de nickel et de cobalt. La somme de ces trois éléments représentait 18 % de la masse totale avec un rapport Ni/Fe égal à 21 %, la somme du nickel et du cobalt représentant environ 4 % du poids total.

Nous avons essayé deux méthodes de filtration de l'eau de neige. Dans la

première, nous avons utilisé de grosses quantités de neige que nous avons filtrées sur une série de filtres de plus en plus fins, et dans la deuxième nous avons utilisé de beaucoup plus petites quantités de neige que nous avons filtrées directement sur des filtres fins.

a) - Méthode de filtration massive

une série de prélèvements ont été effectués à la station A3 en Terre Adélie. Ces prélèvements d'environ 10 kilos de névé chaque ont été conservés dans des bidons de polythène. A l'arrivée au laboratoire de Gif sur Yvette, le contenu des bidons a d'abord été filtré sur filtre sans cendres Durieux, puis sur membranes Millipore.

Après les filtrations, les filtres ont été pesés sur une balance magnétique ; de plus, leur radioactivité a été mesurée.

Dans une troisième étape, l'ensemble des filtres a été calciné, et la matière ainsi obtenue a été pesée. Pour 110 litres d'eau de neige filtrée, nous avons ainsi recueilli 58 mg de matière soit 0,53 mg/l.

Cette quantité est cinq fois plus faible que celle trouvée par MRKOS et que celles trouvées par les méthodes globales dont nous avons parlé précédemment. Il est donc probable qu'elle ne représente qu'une partie des poussières contenues dans la neige.

Dans le tableau 8 nous donnons l'ensemble des résultats que nous avons ainsi obtenus.

Tableau 8

Niveau	Profondeur en cm	Magnétisme par litre	Radioactivité en dpm/litre
1	0 - 29	7,7 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,0
2	29 - 30	47,5 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,0
3	90 - 130	80,5 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	0,9
4	130 - 141		6,3
5	141 - 170	40,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,7
6	170 - 190	132,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	0,55
7	190 - 210	35,4 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,3
8	210 - 245	61,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,0
9	245 - 264	56,4 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	2,0
10	264 - 275	56,6 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	2,75
11	275 - 300	138,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	3,7
12	300 - 328	124,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	1,2
13	328 - 340	56,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	0,9
14	340 - 358	220,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	0,44
15	358 - 400	75,0 10 ⁻⁶ Fe ₂ O ₃ γ	0,5
	Moyenne	87,0	1,68

Le rapport du magnétisme, exprimé en milligrammes équivalents d'oxyde de fer

$\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$, au poids, exprimé en milligrammes est en moyenne :

$$\frac{0,087}{0,53} = 0,164$$

Il s'agit donc d'une poussière de susceptibilité magnétique élevée, analogue à celle de la poussière collectée dans les vols stratosphériques pour laquelle ce rapport, en novembre 1965, était :

20 novembre 1965 : 0,15

24 novembre 1965 : 0,06

25 novembre 1965 : 0,05

Une collection de poussières de taille supérieure à 50 microns, faite à Gif avait également montré un rapport de même ordre : 0,18, les poussières collectées par un CRAPAL donnaient un rapport de 0,048. Lorsque les collections étaient faites par filtration d'air, ce rapport était beaucoup plus faible : 0,0074 en novembre 1965 et 0,0055 en mars 1966.

Si l'on se base sur les caractéristiques magnétiques, la poussière recueillie par filtration de grandes quantités de neige s'apparente donc à la poussière de grosses dimensions des régions tempérées.

Seule la répartition en fonction de la profondeur, donc en fonction du temps, de ces poussières, telle qu'elle est donnée par les mesures magnétiques présente un certain intérêt.

Sur la figure 23 nous avons reporté d'une part la radioactivité bêta globale de ces poussières et d'autre part les valeurs des pesées magnétiques en fonction de la profondeur.

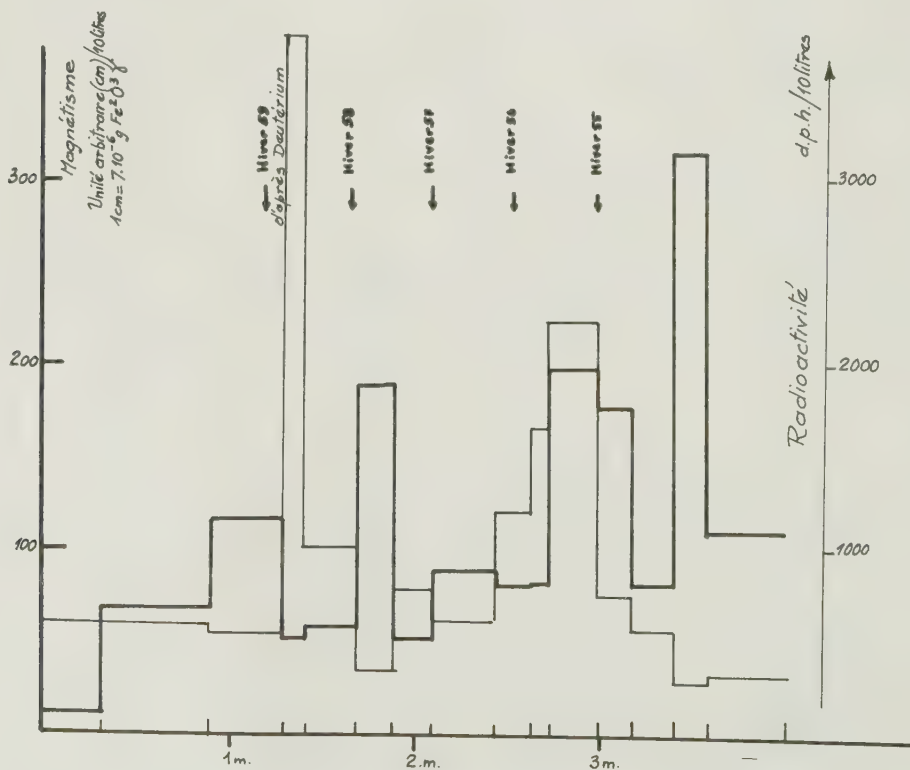


Figure 23

Les mesures de la radioactivité bêta globale nous permettant de suivre l'évolution de la retombée radioactive due aux essais nucléaires dans l'atmosphère nous donne une échelle de temps. C'est ainsi que le grand pic que l'on observe au niveau (130 à 141 cm de profondeur) nous indique, d'après la chronologie des explosions nucléaires, et par comparaison avec d'autres carottes qui ont été étudiées du point de vue de la radioactivité artificielle, que ce niveau correspond au printemps 1959. De même, le maximum situé à 280 cm de profondeur (niveau 11) doit correspondre au printemps-été 1956. La profondeur de 3 mètres devant correspondre au niveau décrit par E. PICCIOTTO et S. WILGRAIN (1963) comme étant le premier niveau spécialement riche en débris radioactifs provenant des essais nucléaires dans l'atmosphère.

Si on compare les mesures radioactives et les mesures magnétiques, on voit que, dans l'ensemble, elles présentent les mêmes variations. Malheureusement, dans le cas du niveau 4 où l'on observe un grand maximum de radioactivité, le filtre de poussières a été endommagé et on ne peut dire s'il correspond ou non à un maximum. Les valeurs plus faibles que l'on trouve pour le niveau 8 qui est un niveau de printemps pourrait s'expliquer en partie par le fait que le prélèvement dans la carotte représente une plus grande partie de l'année, masquant ainsi les effets saisonniers. Cette comparaison nous permet donc de penser que le taux de retombées magnétiques dans l'Antarctique subit des variations annuelles analogues à celles des retombées radioactives.

C'est pour préciser ce phénomène que nous avons eu recours à la deuxième méthode semi-globale dont nous avons parlé plus haut et qui consiste à filtrer directement sur des filtres fins des échantillons beaucoup plus limités de glace.

b) - Filtration directe de petites quantités de glace

Une carotte provenant du site A3 a été séparée en morceaux de l'ordre de 250 grammes correspondant à environ 10 cm de longueur de carotte. Chaque morceau a été fondu dans un entonnoir de verre directement relié à un porte-filtre millipore. L'ensemble de filtration était placé dans une cage en plexiglass dans un laboratoire sans poussière afin d'éviter toute pollution pendant l'opération.

Les particules ainsi recueillies sur filtre millipore 1,2 micron étaient ensuite examinées au microscope binoculaire sous un grossissement 200.

La figure 24 présente l'ensemble des résultats de comptages des sphérules.

Les particules de forme sphérique ont été, jusqu'à présent, considérées comme étant celles qui avaient le plus de chance d'être d'origine cosmique parce que la forme sphérique ne correspond pas à un réseau minéralogique et n'apparaît que dans des cas de formations de concrétion. Par ailleurs, les éclats de minéraux terrestres de dimensions microscopiques conservent toujours des formes anguleuses. D'autre part, beaucoup de sphérules sont magnétiques montrant par là que le fer s'y trouve soit à l'état métallique, soit à l'état d'oxyde non hydraté. Les analyses chimiques et les analyses de diffraction de rayon X faites sur les sphérules ont montré que l'on n'était pas en présence de minéraux mais plutôt en présence de solutions solides de différents éléments non séparés par la géochimie terrestre. Ainsi donc, le comptage des sphérules présente un intérêt particulier, tant sur le plan pratique que sur le plan théorique. Cependant, plusieurs auteurs estiment que la forme sphérique n'est pas du tout la forme dominante dans la poussière cosmique.

Par ailleurs, le recours au comptage optique permet la différenciation de

de diverses classes de particules. On établit ainsi le pourcentage des différentes catégories pour un litre d'eau de fusion. Dans nos expériences, les particules comptées sont plus grandes que 5 microns.

Dans un échantillon prélevé à 200 mètres de la côte, dans le site AOF, on a ainsi compté les différentes catégories de particules qui sont données dans le tableau 9.

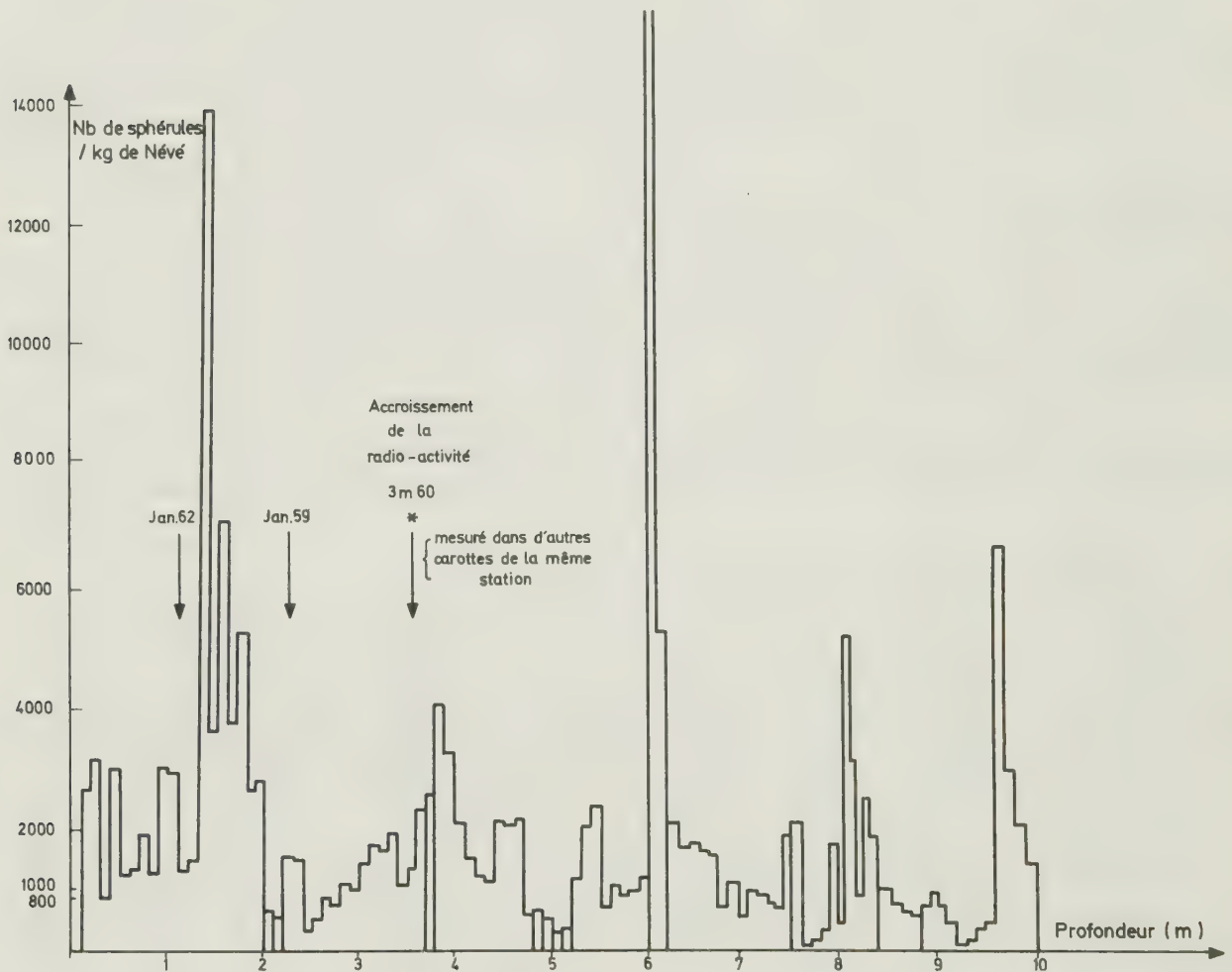


Figure 24 - Nombre de sphérules par kg de Névé - TERRE ADELIE - STATION A3 -

Tableau 9

Amas	Amas gélatineux, blanc gris, jaune vert	12	20
	Amas noirs spongieux	2	
	Gros éclats bruns	4	
	gros éclats gris	2	
Formes longues	Fils et bâtonnets blancs	152	171
	jaune clair	11	
	oranges	3	
	rouges	1	
	verts très clair	2	
	noirs	2	
Formes à angles vifs	Eclats blancs incolores	121	529
	noirs mats	44	338
	noirs brillants	30	
	gris	38	
	oranges foncés - bruns	38	
	oranges clairs	24	
	jaunes clairs	37	
	bleus	4	
	verts	1	
	roses	1	
Sphérules	Noirs brillants	51	62
	Noirs mats	6	
	Blancs incolores	5	
			591
			= 600

Dans la carotte A34 qui a servi à étudier les variations du nombre des sphérules en fonction de la profondeur, le rapport du nombre de sphérules au nombre total de particules, sphérules compris, est 6,8 %.

Le nombre total de sphérules supérieures à 5 microns, dans la carotte de 10 mètres de long étant 23 177 (par extrapolation, les comptages réels n'ayant porté que sur des quantités de névé inférieures au kilo, environ 300 grammes), on trouve, avec le facteur 2,2 de "lavage incomplet" dont nous avons parlé plus haut, 50 000 sphérules, soit :

2 270 sphérules par kilo de neige.

Comme en Terre Adélie le taux d'accumulation annuel de la neige est de 43 cm et que la neige a une densité moyenne de 0,5, nous avons :

49 sphérules/cm²-an.

En prenant une taille moyenne de 7 microns et une densité de 3, nous avons des particules de 5.10^{-10} g, soit une masse totale de :

$1,2.10^{-5}$ tonnes/Terre-an.

Cette méthode est très intéressante pour étudier les variations du taux de retombées ou les valeurs relatives selon la latitude. Contrairement aux informations fournies par les filtrations massives, les comptages de sphérules ne montrent pas de périodicité annuelle. CROZIER (1966), dans les régions tempérées, avait pourtant signalé des périodicités annuelles dans le taux de retombées de sphérules. MARSCHALL (1962) avait aussi cru voir la même périodicité pour les très fines particules dans la glace. Il semble que le découpage de la carotte par tranches de 10 cm alors qu'il ne tombe dans cette région que 30 cm de neige par an amorti les variations qui auraient été plus nettes si le découpage avait été plus fin.

L.D. TAYLOR et J. GLIOZZI (1964) avaient signalé par ailleurs une périodicité de 2,5 ans. La figure donnant le nombre de sphérules en fonction de la profondeur dans notre carotte montre plutôt des maxima espacés de 1,50 m, c'est-à-dire de 5,5 ans. Cette périodicité concorderait avec le double de la périodicité du cycle solaire. Une même analogie avait été observée par OESCHGER (1967) pour le tritium. NEZAMI et LAMBERT (1964) ont également estimé que les retombées de plomb 210 suivent le rythme solaire en antarctique.

L'existence de cette périodicité ne signifie pas que cette poussière soit d'origine solaire, on peut simplement être en présence d'une modulation par le rayonnement solaire des hautes couches de l'atmosphère.

CONCLUSIONS ET CRITIQUE DE LA METHODE

Les divergences que l'on constate en employant deux méthodes différentes d'étude dans une même région sont très grandes. Nous verrons plus loin que lorsqu'on passe à d'autres régions, l'exploitation des résultats devient encore plus difficile.

Il faut remarquer que l'utilisation de différentes techniques amène à mesurer les composantes différentes de la poussière cosmique ce qui peut expliquer les divergences dans les résultats.

Dans la méthode par filtration, les particules très fines échappent à l'évaluation car l'utilisation de filtres très fins est impossible, ces filtres se colmatant très rapidement, ils ne permettraient de filtrer que de très petites quantités de neige.

Par ailleurs, il est parfaitement concevable que l'emploi d'un collecteur de neige amène une accumulation privilégiée des poussières de grosses dimensions qui voyagent seules, sans être accompagnées par de la neige. Par contre, dans les méthodes de comptage où l'on opère sur de la neige en place, les particules très fines ne sont pas avantagées. Il faut donc chercher les causes de la différence entre ces deux méthodes dans une différenciation qui prendrait place dans l'atmosphère même. Cette différenciation aurait pour effet que la neige antarctique recevrait une quantité d'ions cosmiques identique au reste de la Terre, mais ne recevrait qu'une quantité mineure de poussière microscopique. D'autres informations semblent bien indiquer qu'un tel processus géophysique existe réellement. Dans une étude comparative du nombre de sphérules de taille microscopique par mètre carré et par an, R.A. SCHMIDT et J.J. COHEN (1964) arrivaient à la conclusion que, entre l'Antarctique et le Groenland, il y avait probablement une différence d'un facteur 100 en faveur du Groenland, et plus généralement en faveur des latitudes Nord.

Quelles que soient les raisons d'une accumulation préférentielle des particules microscopiques dans l'hémisphère Nord, on comprend que les ions évaporés à partir des météores, comme les ions calcium, ne vont pas avoir le même temps de résidence que les particules microscopiques. Celles-ci ayant un temps de résidence de l'ordre du mois vont tomber approximativement aux mêmes latitudes que celles de leur entrée dans l'atmosphère. Les ions, eux, ont un temps de résidence beaucoup plus long et ont le temps de se répartir plus également entre les deux hémisphères.

Ainsi, la détermination de la masse totale de poussière effectuée à partir de dosages d'ions, notamment du calcium, donnera des chiffres très voisins de ceux obtenus à partir de déterminations globales de particules de tailles microscopiques et submicroscopiques dans l'hémisphère Nord.

Les méthodes d'étude applicables à la neige sont, en partie, applicables à l'Océan, avec éventuellement l'avantage que le milieu de collection peut être éloigné de toute côte découverte, mais, avec l'inconvénient d'une action chimique sur la poussière qui est très important.

Chapitre 7

RETOMBEE COSMIQUE DANS LES OCEANS

HISTORIQUE

L'existence de sphérules magnétiques dans les sédiments marins a été signalée pour la première fois en 1883 par Sir John MURRAY et RENARD (1883), dans une carotte de sédiments provenant de l'expédition du CHALLENGER. Il est intéressant de remarquer que, dans la même publication, MURRAY et RENARD signalent l'existence, dans ces mêmes sédiments, de niveaux de cendres volcaniques alors qu'ils n'étaient pas préparés à la recherche des poussières cosmiques, ceci montre que ces sphérules cosmiques apparaissaient déjà comme très différentes des produits volcaniques.

Depuis, de nombreux chercheurs, parmi lesquels il faut signaler Hans PETTERSON (1947) ont poursuivi ces recherches.

D'autres aspects des sédiments ont été également étudiés pour leurs éventuelles relations avec la poussière cosmique : C. MERRIHUE (1963) a montré que la partie qui pouvait être extraite du sédiment avec un aimant contenait des gaz rares, dans un rapport isotopique qui ne concordait pas avec celui rencontré dans les roches terrestres ; O. SCHAEFFER (1965) a montré que la fraction grossière des sédiments contenait du chlore 36, nuclide radioactif formé dans la poussière cosmique par l'action du rayonnement cosmique. De la même manière; B.S. AMIN, D.P. KHARKAR et D. LAL (1966) ont montré que les sédiments marins contenaient de l'aluminium qui devait provenir du bombardement de la poussière cosmique par le rayonnement cosmique.

D'autres auteurs (PETTERSON et ROTCHI (1950) et P. BONNER (1965)) ont montré que l'étude chimique des sédiments amenait à conclure qu'il y avait dans les sédiments marins un apport d'éléments qui ne correspondaient pas à leur rapport dans la teneur dans la croûte terrestre, ces éléments devaient donc être attribués à un apport cosmique.

Nous avons examiné d'une part cet aspect géochimique des sédiments et d'autre part l'aspect particulaire en nous attachant plus particulièrement au dénombrement des sphérules qui, par leur forme et leur magnétisme avaient été présumées cosmiques.

La forme sphérique

La forme sphérique des sphérules ne doit pas être le résultat de leur pénétration dans l'atmosphère et de la fusion sous l'effet de l'échauffement dû au freinage. En effet, que les sphérules viennent du Soleil ou au contraire de l'extérieur du système solaire, seules des orbites extrêmement circulaires auraient pu

leur éviter la fusion sous l'effet du rayonnement solaire. Une sphère de 10 microns ou plus peut être considérée, en première approximation, comme un corps noir et le flux d'énergie présent dans l'espace circum solaire limité au flux lumineux solaire. Dans ces conditions, on peut évaluer la température des sphérules dans l'espace libre en considérant qu'il y a équilibre entre l'énergie reçue : $E = \pi a^2 \phi$ et le flux rayonné : $4 \pi a^2 (T^4 - T_0^4) K$, T_0 étant la température absolue du milieu et K une constante.

D'après S.I. RASOOL (1967) l'énergie solaire atteint $1,4 \cdot 10^6$ erg/cm² s, soit 2 col./cm² mn à la surface de l'atmosphère terrestre.

On a donc :

$$\pi a^2 1,4 \cdot 10^6 = 4 \pi a^2 \times 0,56 \cdot 10^{-4} T^4$$

ou d'une manière plus générale :

$$\frac{\text{Flux solaire}}{D} = \sigma \times C.S.$$

où D est la distance Soleil objet en unité astronomique

C, S des constantes liées au Soleil et à la loi de Stéfane

σ la surface de rayonnement de la particule.

La plupart des sphérules étant des verres, on peut supposer qu'à 1 500° la très grande majorité sera fondue, les sphérules en fer étant également fondues à 1 535°. Nous avons trouvé qu'une particule sera portée à cette température à partir de 1/30 d'unité astronomique c'est-à-dire 6,8 rayons solaires, et environ 25 rayons solaires pour les silicates.

Etant donné que certains auteurs estiment que la couronne solaire peut s'étendre au-delà de 10 rayons solaires, la distance à partir de laquelle les particules seront fondues peut être beaucoup plus grande.

La pression de rayonnement ne devient dominante que bien au-delà du flux nécessaire pour fondre les particules, il en est de même de la pression du vent solaire. Dans tous les cas, les petites particules peuvent s'approcher du Soleil à moins de 7 rayons solaires et donc être fondues, la forme sphérique apparaît donc possible comme une forme primaire et spatiale.

Comme tous les auteurs, nous avons supposé que l'abondance relative de matière cosmique et donc le nombre de sphérules, serait maximal dans les régions océaniques à sédimentation lente et éloignées des côtes. Notre étude porte donc essentiellement sur une carotte prélevée dans l'Océan Indien dans une région de plaine abyssale.

A titre de comparaison, nous avons ensuite examiné les mêmes taux et les variations géochimiques dans trois carottes de la Mer Méditerranée, zone de sédimentation rapide, puis, finalement, nous avons étudié le nombre de sphérules dans un lac à sédimentation encore plus rapide. Puis les sphérules dans la Neige Antarctique.

Comptage et extraction des sphérules

L'extraction des sphérules a été faite sur 500 milligrammes de sédiment sec. Après la pesée, le sédiment était dilué dans de l'eau oxygénée à 200 volumes afin de détruire au maximum la matière organique et libérer tous les grains.

Après réduction du volume par évaporation, les 500 milligrammes de sédiment étaient transférés dans une coupelle de matière plastique à fond plat. Cette cou-

pelle était montée sur un dispositif spécial à double rotation qui a été construit à cet effet et qui permettait une exploration lente de tous les points de la coupelle par la pointe d'un aimant ophtalmologique à pointe amovible.

Le champ au voisinage de la pointe, mesuré avec une sonde à effet Hall, était 2 500 gauss à 0,5 mm (épaisseur de la sonde) ; de 100 gauss à 1 mm et 800 gauss à 2 mm ; le gradient de champ entre 0,5 mm et le contact de la pièce polaire étant évidemment plus fort.

Dans ces conditions, les particules étaient, pendant le temps de l'exploration, toutes touchées par la pointe de l'aimant ou n'en étaient éloignées que de quelques dixièmes de millimètres et se collaient donc à la pointe.

La pointe étant périodiquement démontée de l'aimant et lavée à l'alcool, les particules étaient ainsi disposées sur un filtre Millipore de porosité 1,2 μ .

Les comptages ont été faits au microscope binoculaire avec un grossissement 100 et éclairage latéral. Seules les particules complètement sphériques et d'un diamètre supérieur à 10 microns ont été comptées.

I - ETUDE DE SEDIMENTS OCEANIQUES PROFONDS

La carotte étudiée a été prélevée pour le Lamont Geological Observatory par le Dr Marcus LANGSETH. Une moitié longitudinale de cette carotte nous a été aimablement fournie par le Docteur EWING.

La carotte (référence V 18-20) a été prélevée le 5 juillet 1962 au point :

Latitude : 25°46' Sud
Longitude : 95°58' Est
Profondeur : 4 967 mètres.

Elle provient d'une cuvette profonde, large d'environ 1 500 kilomètres, relief correspondant dans la nomenclature de HEEZEN à un "swale" juste au Nord de Broken Ridge.

La longueur de la carotte est 1 000 centimètres. La partie profonde, dans les derniers 230 centimètres présentait des phénomènes de fluage dus vraisemblablement au piston du carottier. Le haut de la carotte était en excellent état. Elle est formée de boue rouge homogène, sans niveau particulier.

De grandes précautions ont été prises lors du démoulage de la carotte, mais il n'a pas été possible de le faire entièrement dans une chambre sans poussière.

Une fois coupée dans le sens de la longueur, la carotte a été remise dans des tubes en plastique et envoyée au Centre des Faibles Radioactivités, où l'ouverture des tubes a été faite en laboratoire sans poussière. Les opérations d'extraction des particules ont été faites dans des boîtes à gant. Les risques de contamination ont donc été réduits au maximum.

Pour évaluer le taux de retombée cosmique par an et par mètre carré, il fallait connaître la vitesse de sédimentation, afin de pouvoir ramener le nombre de sphérules, non pas au gramme de sédiment, mais à l'année.

La carotte se présentant uniquement sous forme de boues rouges homogènes, cela laissait présager une vitesse de sédimentation lente et régulière.

Pour déterminer cette vitesse de sédimentation, nous avons utilisé une méthode nouvelle que nous avons inventée.

Détermination de la vitesse de sédimentation

Diverses méthodes ont été utilisées pour la détermination de la vitesse de sédimentation dans les océans. On peut citer en particulier les méthodes ionium/thorium, ionium/uranium, protectinium/ionium, carbone-14, potassium/argon, béryllium-10.

Dans la plupart des cas, il est nécessaire de détruire les échantillons pour extraire les nuclides à étudier. Ces extractions sont difficiles et nécessitent des techniques élaborées qui peuvent être souvent des causes d'erreur et, surtout l'échantillon ne peut plus être utilisé pour d'autres études.

Nous avons utilisé une méthode de spectrométrie gamma non destructive.

Cette méthode consiste à déterminer les teneurs en ionium et thorium dans des sections successives de carotte de sédiment océanique en mesurant les rayonnements gamma émis par leurs descendants (1968).

En prenant 80 000 ans comme la valeur de la période de l'ionium, on obtient ainsi un taux de sédimentation de 1,5 mm par 1 000 ans.

Des vitesses de sédimentation voisines ont été trouvées par différents auteurs. Notamment, d'après GOLDBERG et KOIDE (1962) le taux de sédimentation est de l'ordre de 0,5 mm par 1 000 ans dans l'Océan Pacifique Sud et 1 mm par 1 000 ans dans l'Océan Pacifique Nord. Notre valeur est donc compatible avec ces résultats. La nouvelle méthode que nous avons employée est donc simple, non destructive, précise et rapide.

Etude des sphérules

La carotte (V.18-20) a été étudiée avec des prélèvements distants de 1 mètre, donc séparés dans le temps de 6.10^6 ans. Cette étude avait pour but d'établir un nombre moyen de sphérules tel qu'il a pu exister depuis le Tertiaire et comparer notre méthode de travail aux résultats déjà existants.

L'extraction magnétique a été effectuée comme nous venons de l'indiquer mais, dans une première exploration la pointe de l'aimant touchait tous les grains, puis, la partie ainsi extraite était soumise à une deuxième extraction pour en extraire les particules les plus magnétiques. Dans cette deuxième opération, la pointe de l'aimant explorait la coupelle à 1 mm du fond.

Le tableau 10 résume des résultats trouvés. La valeur moyenne du nombre de sphérules magnétiques est 1 086 sphérules par gramme de sédiment.

En estimant la taille moyenne des sphérules égale à 15 microns et en leur supposant une densité 3, le poids d'une sphérule est $5,3.10^{-9}$ gramme.

On a donc : $1\ 086 \cdot 5,3.10^{-9} = 5,75.10^{-6}$ grammes de sphérules par gramme de sédiment.

Cette quantité est très faible comparée à celle trouvée par d'autres méthodes.

La densité du sédiment en place é été mesurée en pesant et en mesurant le volume de section entière de carotte après séchage. La densité moyenne est : $d = 2,04$.

De ces quantités il faut déduire le bruit de fond des filtres Millipore et la quantité de sphérules introduites sur les vases par les différents rinçages.

Ainsi l'eau de rinçage en même temps qu'elle permettait de décoller les sphérules polaires collées sur les parois, introduisait 25 sphérules de pollution par litre d'eau de rinçage, les rinçages se faisant avec environ 200 grammes d'eau, on introduisait donc 5 sphérules en moyenne de cette manière. Ce chiffre constituait donc la principale source de bruit de fond.

TABLEAU 10

Comptage des sphérules dans une carotte de l'Océan Indien (V 18-20).

Niveau	Nombre total par gramme	Sphérules très magnétiques noires	Sphérules très magnétiques de couleur	Sphérules magnétiques noires	Sphérules magnétiques de couleur
1 mètre	552	316	108	84	44
2	1 846	122	16	1 666	42
3	360	122	8	202	28
4	662	100	18	532	12
5	2 558	420	44	2 092	2
6	1 380	734	196	434	16
7	980	360	86	502	32
8,40	222	142	36	42	2
9	512	350	40	100	22
10	1 792	124	18	1 656	0
Moyenne	1 086,4	279	57	821	20

Le nombre de sphérules qui pouvait être présent par ailleurs sur le filtre à la fabrication ou par contamination lors de la mise en place était lui inférieur à la fluctuation statistique de cette première source de contamination. Le bruit de fond était donc de 3 à 7 sphérules par filtre compté, c'est-à-dire ne représentait que 2/100 de la valeur moyenne du nombre de sphérules qui était effectivement compté, par filtre, ce bruit de fond était donc négligeable.

Le taux de sédimentation ayant été déterminé comme 1,5 mm/1 000 ans, le nombre de sphérules tombant par cm^2 et par jour est donc :

$$8,9 \cdot 10^{-4} \text{ sphérules/cm}^2 \text{ par jour.}$$

La masse d'une sphérule étant pour 7 microns = $5 \cdot 10^{-10}$ grammes, la masse totale des sphérules se trouvant dans les sédiments étudiés représente donc un taux de retombée de :

$$1,7 \cdot 10^{-6} \text{ g/m}^2 \text{ an.}$$

Ceci représente pour toute la Terre une masse annuelle de

$$8,5 \cdot 10^3 \text{ tonnes/Terre an.}$$

Cette estimation est donc en accord avec certaines valeurs publiées par PETTERSON ($5,8 \cdot 10^3$), mais le nombre de sphérules par gramme est très différent. Cette différence peut être attribuée aux différences de taille minimale considérée, PETTERSON travaillant sur des sphérules beaucoup plus grosses obtient des dénombrements beaucoup plus faibles.

Si maintenant on étudie en détail la répartition des nombres de sphérules en fonction de la profondeur (figure 25), on constate de grandes variations. Entre autres, le niveau situé à 2 mètres présente un très grand nombre de sphérules relativement peu magnétiques. Ce niveau, ainsi que le niveau à 5 mètres présente énormément de particules translucides colorées par de l'oxyde de fer et dans certains cas, les particules noires brillantes sont incluses dans une masse translucide. B. GLASS et E.C. HEEZEN (1967) ont suggéré que l'existence de l'événement cosmique qui a créé le champ de Tectites de l'Extrême Orient pouvait être retrouvé dans les sédiments marins. Toutefois, si ce niveau à sphérules translucides représentait cet événement, il devrait correspondre à 0,7 millions d'années, âge mesuré par la méthode du potassium argon pour les Tectites. Or, d'après nos mesures de vitesse de sédimentation, ce niveau situé à 2 mètres correspond à 1,3 million d'années. Il faut cependant rappeler que notre étude n'a été faite que tous les mètres et que, par conséquent, cet événement qui est certainement inscrit dans la carotte peut se trouver à un niveau intermédiaire entre nos prises d'essai.

II - ETUDE DE TROIS CAROTTES DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE

L'étude des sédiments de la Mer Méditerranée a été entreprise dès 1963 et a fait l'objet de deux publications de T. GRJEBINE et al. (1963, 1965).

Les trois carottes que nous avons étudiées avaient été prélevées avec un carottier à piston à bord du N.O. CALYPSO par J. ROS.

Les positions des points de carottage sont les suivants :

Carotte 13	:	41°58' Nord ; 7°5' Est,	profondeur 2 615 m,	longueur 1,50 m
Carotte 14	:	41°24' Nord ; 7°5' Est,	profondeur 2 673 m,	longueur 4,90 m
Carotte 24	:	43°12' Nord ; 7°2' Est,	profondeur 2 323 m,	longueur 3,34 m.

Les deux premières carottes (13 et 14) proviennent de la plaine abyssale (figure 26). La carotte 24, par contre, a été prélevée à la base de la pente continentale, à l'extrémité de la vallée sous-marine de Saint-Tropez. La vitesse de sédimentation a été mesurée par la technique du carbone-14 par Mme G. DELIBRIAS, pour les deux premières carottes. Les âges obtenus n'ont pas montré d'accroissement régulier avec la profondeur, donnant à penser qu'il y avait un fort apport terrigène de carbonates anciens remaniés. La vitesse de sédimentation moyenne était 10 cm/1 000 ans. La position topographique de la troisième carotte permet de penser que la sédimentation est plus rapide.

La carotte 13, à l'exclusion d'un niveau plus sombre à 1,10 mètre, est formée uniformément de vase grise. La carotte 14 est formée par une succession de lits de vase de différentes couleurs, séparés parfois par des lits de sable, mettant en évidence, dans cette zone, l'existence de courants de turbidité donc d'une sédimentation perturbée. Vers 89 et 99 cm, des niveaux plus sombres se distinguent également. La carotte 24 présente des alternances de vase et de sable.

Etude morphologique des sphérules

La fraction magnétique des sédiments a été séparée à partir de un gramme de sédiment par la technique précédemment décrite, sauf que, dans ce cas, l'exploration du sédiment avec l'aimant était faite manuellement. Après lavage de la pointe les particules étaient déposées par filtration sur des filtres Millipore de 1,2 micron. L'examen optique était fait avec un grossissement 100 et 200.

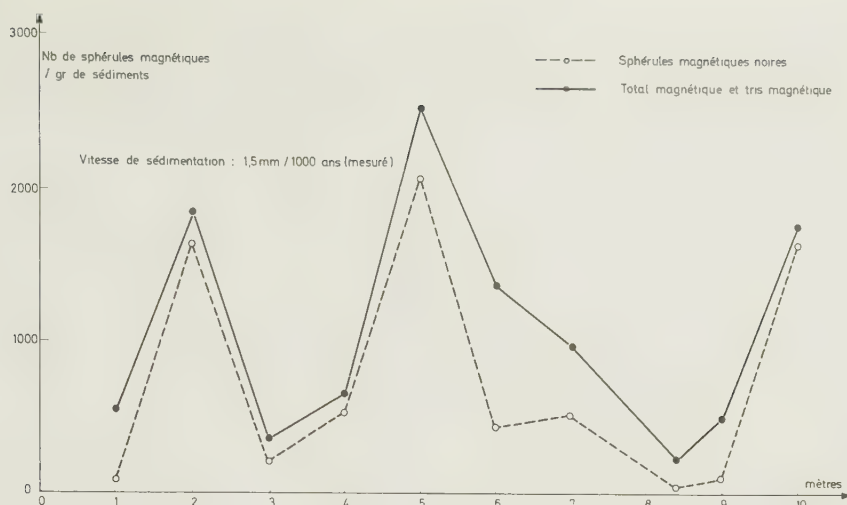


Figure 25 - Nombre de sphérules magnétiques - Carotte (V 18-20) - Océan Indien.



Figure 26 - Position géographique des carottes.

Bien que toutes les particules supérieures à 5 microns aient été considérées, seules les particules parfaitement sphériques ont été comptées, ce qui en fait a ramené la limite inférieure de taille à 10 microns car en-dessous de cette taille, le doute est trop grand sur la forme sauf dans quelques cas isolés.

Dans les comptages, on a classé les sphérules en sept groupes selon leur aspect. Mais cette classification reste arbitraire en raison de l'existence de types intermédiaires. Ceci est confirmé, d'une part par une étude minéralogique effectuée par diffraction de rayons X d'une quinzaine de sphérules qui n'ont jamais montré de structures cristallines et, d'autre part, par des analyses chimiques sur lesquelles nous reviendrons et qui ont révélé des compositions variables et continues entre les diverses sortes de sphérules.

Etude numérique des sphérules

Les tableaux 11, 12 et 13 et la figure 27 montrent les nombres des différentes catégories de sphérules en fonction de la profondeur dans les trois carottes de la Méditerranée.

Les nombres moyens de sphérules pour ces carottes sont :

Océan Indien	1 086 sphérules par gramme
Carotte 13	269 sphérules par gramme
Carotte 14	377 sphérules par gramme (sans considérer le niveau 87-97)
Carotte 14	808 sphérules par gramme (en considérant le niveau 87-97)
Carotte 24	465 sphérules par gramme
Lac Léman	
Lac Nantua	

Les nombres moyens sont donc très différents pour les trois carottes.

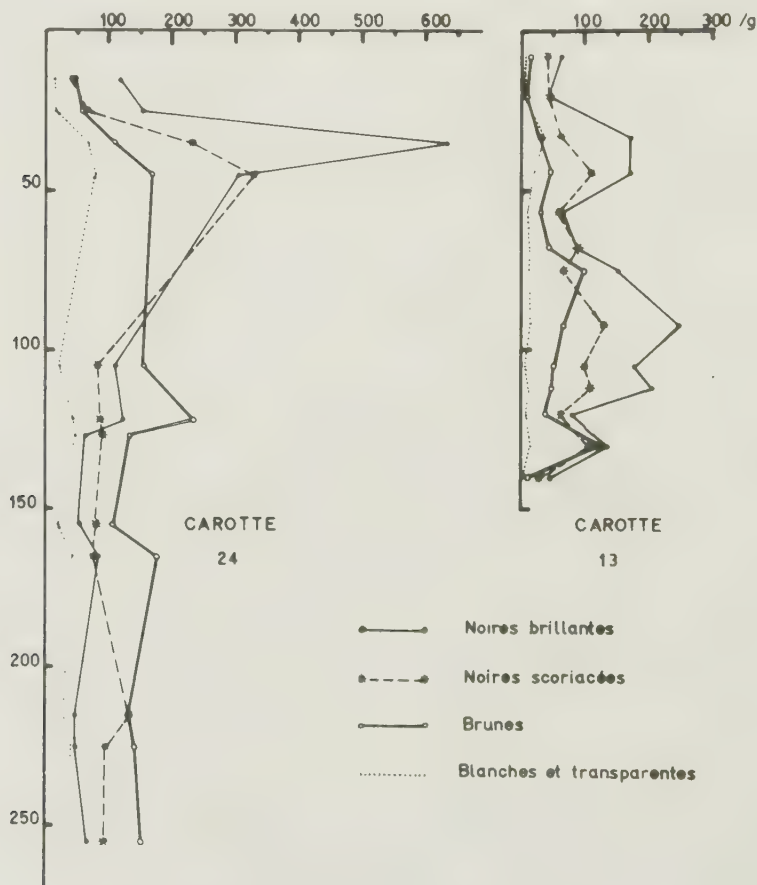


Figure 27 - Nombre de sphérules par gramme de sédiment brut en fonction de la profondeur.

Si des remaniements de sédiment semblent assez probables pour la carotte 24 étant donné sa position à la base du plateau continental et les nombreux lits de sable que l'on y rencontre, la différence entre la carotte 13 et la carotte 14 semble moins claire. Toutefois la richesse en sphérules du niveau 87-97 de la carotte 14 peut donner à penser que :

- les conditions responsables du niveau 87-97 pour lequel nous avons considéré que les sphérules étaient des micro-modules de manganèse, se sont fait sentir dans d'autres niveaux de la même carotte mais à un moindre degré, et que dans tous les niveaux, à côté des sphérules cosmiques on a une certaine contribution de micro-modules de manganèse.

- ou bien, il y a eu des remaniements de sédiment dans les deux carottes et, au cours de ces remaniements on a pu avoir des corrosions plus importantes des sphérules dans la carotte 13 ou au contraire des apports supplémentaires de sphérules dans la carotte 14. Toutefois, il n'y a pas de différence notable de taille des sphérules dans ces deux carottes ce qui ne permet pas de choisir entre ces deux hypothèses.

La taille moyenne des sphérules de la carotte 13 peut être estimée comme voisine de 15 microns, donc de poids $5,3 \cdot 10^{-9}$ gramme.

Il y a donc, pour la carotte 13 :

$1,43 \cdot 10^{-6}$ gramme de sphérules par gramme de sédiment.

Tableau 11

Nombre de sphérules selon les différentes catégories dans les niveaux de la carotte 13.

Niveau (cm)	Total	Noires brillantes	Noires scoriacées	Brunes	Noires dans gangue	Transpa- rentes	Verdâtres translu- cides	Brunes pier- reuses	Blan- ches
33- 13	120	61	38	6	2	2		8	3
15- 25	112	43	45	2	8	5		5	3
30- 37	309	174	62	11	7	36		19	
39- 49	262	174	112	25	8	20	1	22	
51- 61	176	65	60	7	8	7		23	3
63- 73	248	88	88	23	16	14		19	
75- 85	338	152	65	44	8	12		56	1
87- 97	462	248	129	40	5	16		24	
99-102	329	172	99	29	1	7		21	
99-109	219	73	87	24	4	7		24	
109-115	378	206	109	23	7	11		22	
115-125	193	79	63	16	5	7	1	22	
125-135	392	136	106	55	15	12		66	2
135-145	91	44	27	8	4	2	1	3	2
Moyenne	267	122	78	22	7	11	1	24	2

Tableau 12

Nombre de sphérules selon les différentes catégories dans les niveaux de la carotte 14.

Niveau (cm)	Total	Noires brillantes	Noires scoriacées	Brunes	Noires dans gangue	Transparentes	Translucides	Brunes pierreuses	Brunes total
40- 43	431	291	107	4	9	11		9	13
87- 97	2 530	20	2 496		24				
97-107	270	120	78	30	14			14	44
222-237	498	214	186	46	10	16		26	72
416-418	312	172	85	10	8	16		21	31
Moyenne	1 511	163	590		13				
Sans 87-97	377	199	114	23	10	14		17	40

Tableau 13

Nombre de sphérules selon les différentes catégories dans les niveaux de la carotte 24.

Niveau (cm)	Total	Noires brillantes	Noires scoriacées	Brunes	Brillantes dans guangue	Transparentes de diverses couleurs	Translucides verdâtre	Brunes pierreuses	Reniformes	Blanches
15	229	116	42	46	10	15			2	
25	311	152	65	58	19	17				
35	1114	634	232	107	68	44	14		6	9
45	911	302	327	83	37	38	18	84		21
105	387	109	83	152	20	22				1
122	495	123	85	77	13	18	20	155		4
127	333	61	89	56	8	18	12	74		14
155	270	53	80	25	7	12	6	82	3	2
165	400	81	75	60	25	25	14	115	1	4
215	352	46	133	53	16	14	10	75		5
225	336	46	95	68	10	23	10	72		12
255	370	66	92	72	16	20	16	79	4	5
Moyenne	465	144	116	71	21	22	13	92	3	8

Le taux de sédimentation mesuré par le carbone-14 est de l'ordre de 10 cm par 1 000 ans. Ceci signifie donc que l'on a, en prenant une densité de sédiment en place voisine de 2 :

$$1,47.10^{-2} \text{ sphérule cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$$

avec une taille moyenne de 15 microns :

$$2,7.10^{-4} \text{ grammes de sphérules m}^{-2} \text{ an}^{-1}$$

soit pour toute la Terre :

$$1,35.10^5 \text{ tonnes par an.}$$

Pour la carotte 14 nous trouvons de la même manière :

$$2,06.10^{-2} \text{ sphérules cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$$

$$\text{soit : } 4.10^{-4} \text{ grammes de sphérules m}^{-2} \text{ an}^{-1}$$

soit pour toute la Terre :

$$2.10^5 \text{ tonnes par an.}$$

Pour la carotte 24, le problème est différent, en effet, il y a de très grandes chances que les sédiments qui s'y trouvent aient été remaniés. Sa situation à la base du Talus continental fait penser à un taux de sédimentation plus rapide. La taille moyenne des sphérules est beaucoup plus grande et on peut l'estimer à 25 microns.

Le poids de sphérules par gramme de sédiment est alors :

$$11,4.10^{-6} \text{ grammes de sphérules}$$

avec un taux de retombée de 9,3 sphérules $\text{cm}^{-2} \text{ an}^{-1}$,

soit un taux de retombée de :

$$2,28.10^{-3} \text{ grammes m}^{-2} \text{ an}^{-1}$$

ce qui fait pour toute la Terre

$$1,14.10^6 \text{ tonnes.}$$

R.A. SCHMITT (1964) a cherché à expliquer les différences de nombre de sphérules dans les différents sédiments en supposant une action du champ magnétique terrestre. Cette supposition nous semble difficile à soutenir. Pour qu'un tel effet existe, il faudrait que les sphérules, non seulement aient une charge électrique lors de leur arrivée sur Terre, ce qui est peu probable, mais aussi, orbitent autour de la Terre un certain temps, ce qui est encore moins probable. Mais, si ces conditions étaient réalisées, on aurait pu effectivement avoir sous l'action du déplacement dans le champ magnétique terrestre une dérive des sphérules qui seraient entraînées chargées dans l'espace. La différence de statistique observée par les différents auteurs nous semble donc devoir être mise à la charge, soit d'une anisotropie du flux astronomique, ce qui est très possible, soit à la charge de la corrosion qui serait alors différente dans les différents sédiments. Pour tenter de trancher entre ces deux hypothèses il fallait examiner le nombre de sphérules dans des sédiments se trouvant à la même latitude mais séjournant dans des milieux différents. Pour comparer avec les résultats obtenus sur les carottes de Méditerranée, on pouvait utiliser soit une carotte provenant de la région centrale de l'Atlantique où le milieu est équivalent, mais où le temps de séjour des particules est

nettement plus grand, soit des carottes de milieux lacustres, milieux où les caractéristiques de corrosion sont très différentes. Nous avons choisi cette dernière solution en étudiant une carotte provenant du Lac Léman.

III - ETUDE DU MILIEU LACUSTRE

En dehors de l'étude des effets de la corrosion, l'étude des sphérules dans les lacs présente plusieurs autres intérêts. Tout d'abord on recoupe une période du quaternaire beaucoup plus récente et on peut donc examiner notamment s'il y a une relation entre les taux de poussière cosmique, représentées par les sphérules, et les grandes variations qui ont marqué le quaternaire récent, surtout les variations climatiques.

L'étude des périodes préhistoriques était également intéressante pour la comparaison des taux de retombée actuels des sphérules et ces taux avant l'ère industrielle, pendant des périodes où le volcanisme n'avait pas eu d'importance particulière.

Pour l'étude de la quantité de matière cosmique tombant sur la Terre, les comptages de sphérules dans les lacs présentent un inconvénient important : l'apport fluvial.

En effet, dans les régions océaniques situées suffisamment loin de la Terre, la totalité des matériaux déposés a subi des transformations poussées : les minéraux roches magnétiques et sédimentaires, sont détruits et le dépôt est constitué essentiellement soit de matière dégradée comme les argiles, soit de minéraux de néoformation. On est en droit de supposer que lorsqu'on rencontre dans ce milieu des particules microscopiques qui n'ont pas subi de dégradation, ces particules, cosmiques ou non, ont été apportées par la voie éolienne, il s'agit donc bien d'un dépôt ayant une origine extérieure à l'Océan, dilué dans la masse du sédiment. C'est le cas de la carotte de l'Océan Indien que nous avons étudiée. Dans les sédiments provenant de la Mer Méditerranée l'interprétation des résultats est déjà plus difficile, en effet, à côté des sphérules de provenance atmosphérique, d'autres éléments de provenance terrestre sont présents, notamment dans la fraction grossière, l'apport terrigène non corrodé étant, dans ce cas, encore important. On est donc en droit de se demander si une partie des sphérules n'est pas, elle aussi, apportée des continents et déposée sans subir de destruction. Le nombre de sphérules comptées représenterait alors la somme de ces deux apports, l'apport vertical atmosphérique, que nous supposons cosmique, et l'apport horizontal par les fleuves puis les courants marins. Cependant, si nous n'avons pas tenu compte de cette contribution dans l'étude des carottes méditerranéennes c'est que le nombre des sphérules était plutôt en anticorrélation avec la fraction grossière, ceci signifiait clairement que l'apport horizontal de sphérules était négligeable par rapport aux variations de la masse totale.

Dans un lac, le problème de l'apport fluvial est beaucoup plus important, et il est nécessaire de tenir compte d'une part de l'apport en sphérules par les fleuves et d'autre part de leur départ. Il est bien évident qu'une seule mesure du nombre de sphérules entrant et sortant d'un lac ne peut donner qu'un ordre de grandeur, la pluviométrie, l'évaporation et les variations de niveau du lac étant elles aussi autant de facteurs variables. La même critique doit être émise aussi à l'égard

des sédiments eux-mêmes car leur quantité par rapport à une unité de temps est très variable or le nombre de sphérules ne peut être ramené à une unité de temps qu'en supposant un taux de sédimentation constant.

Par ailleurs, une autre contribution extérieure peut exister, en effet, l'érosion attaque différentes roches, si celles-ci sont des roches sédimentaires on aura un apport de sphérules fossiles.

On pourrait encore trouver d'autres facteurs influençant les apports extérieurs de sphérules. Toutefois il semble que l'ensemble de ces contributions, à l'exception de l'apport fluvial, est peu important et ne rend pas inutile l'étude de la répartition des sphérules dans une carotte lacustre. C'est pourquoi nous avons entrepris l'étude d'une carotte prélevée dans le Lac Léman.

Etude de la carotte CL 42

Evaluation de la contribution fluviale.

Cette détermination a été faite en filtrant sur un filtre Millipore des prélèvements d'eau. Les filtres étaient ensuite mouillés avec de l'eau distillée et mis dans un bain à ultra-sons pour remettre les particules en suspension dans l'eau au-dessus du filtre. Ensuite le dépôt était traité de la même façon que les sédiments et les sphérules extraites magnétiquement, démagnétisées et refiltrées sur un filtre Millipore pour les comptages au microscope.

Le Rhône, en amont du Lac Léman contient : 58 sphérules par litre
 en aval du Lac : 43 sphérules par litre
La Drance, en amont du Lac : 16 sphérules par litre.

Dans un autre comptage on a observé une différence beaucoup plus grande :

Le Rhône en amont du Lac Léman	contenait	:	113 sphérules par litre
en aval du Lac		:	33 sphérules par litre
La Drance, en amont du Lac		:	75 sphérules par litre.

Pour la précision de ces mesures, il est certain qu'il serait nécessaire de travailler sur de beaucoup plus grandes quantités d'eau, la pollution, même dans un laboratoire sans poussière introduisant facilement une dizaine de sphérules par litre. Mais la technique de filtration limite la quantité d'eau en raison du colmatage du filtre par l'ensemble des particules contenues dans les eaux de fleuves, il serait donc nécessaire de développer une technique de centrifugation de l'eau, sur le lieu même de prélèvement.

Pour établir un bilan entre les particules entrant et sortant, il est nécessaire de connaître le débit des fleuves. D'après les mesures de ORAND, les débits étaient, le 11 août 1967 :

Rhône en amont du Lac : 350 m³/s
 Drance en amont du Lac : 12 m³/s
 Rhône en aval du Lac : 400 m³/s.

Le supplément d'eau sortant du lac étant fourni par la pluie et les petites rivières de la rive suisse du Lac, l'Aubonne et la Veveyse. Ce bilan est du reste variable, tout comme le niveau du Lac.

Etant donné les nombres de sphérules par litre que nous avons obtenus, on trouve de $3,3 \cdot 10^6$ à $32 \cdot 10^6$ sphérules introduites et restant dans le Lac par seconde,

ce qui représente de $28,5 \cdot 10^{10}$ sphérules par jour à $370 \cdot 10^{10}$ sphérules par jour. La surface du Lac étant 580 km^2 , la contribution des fleuves peut donc être environ :

$0,05 \text{ sphérule/cm}^2 \text{ jour}$ à $0,6 \text{ sphérule/cm}^2 \text{ jour}$.

Cette contribution peut donc être très importante puisqu'elle représente le dixième ou même est égale à la valeur moyenne trouvée dans les sédiments du Lac comme nous le verrons plus loin.

Toutefois, il est préférable de faire cette comparaison, non pas avec le nombre de sphérules trouvées dans les sédiments, mais avec le flux de sphérules actuel, tel qu'il a pu être mesuré et dont nous parlerons plus loin. Mais, même dans ce cas, la contribution fluviale peut atteindre 30 % du taux actuel.

Bien que ces mesures ne soient pas très précises et surtout pas assez nombreuses, on peut établir la validité de ce bilan hydraulique en notant que, pour la sédimentation on obtient par cette méthode de très bons résultats. En effet, les poids de sédiment par litre, pour les mêmes prélèvements étaient :

Rhône en amont du Lac	:	136 mg/l
Drance	:	33 mg/l
Rhône en aval du Lac	:	6 mg/l.

Le total introduit dans le Lac et pondéré par rapport aux débits relatifs et autre litre moyen est donc :

121 mg/l dont 115 mg/l restent dans le Lac.

Ceci amène donc actuellement un apport de sédiment de :

$4,6 \cdot 10^4$ grammes/seconde.

alors que la détermination de la masse introduite dans le Lac, que l'on peut calculer à partir des vitesses de sédimentation est :

$1,8 \cdot 10^4$ grammes/seconde,

en supposant une densité 2 pour le sédiment en place, un facteur 2 semble être un excellent accord, compte tenu des variations en teneurs alluvionnaires du Rhône selon les périodes de l'année.

Etude du nombre de sphérules

a) - Lac Léman

Les sphérules ont été étudiées, dans le Lac Léman, dans une carotte et dans quelques prélèvements additionnels.

Pour trois échantillons on a cherché à déterminer quel était le rapport entre les sphérules très magnétiques et les sphérules magnétiques. Les sphérules très magnétiques, comme nous l'avons vu, sont celles qui sont extraites lorsque l'on déplace l'aimant à une distance d'environ 1 millimètre du sédiment, ce qui représente, au niveau du sédiment un champ inférieur à 800 gauss et les sphérules peu magnétiques sont celles qui nécessitent, pour être extraites, le contact avec l'aimant, soit un champ supérieur à 2 500 gauss.

Les trois échantillons traités de cette manière ont montré des rapports :

C 44, n 340	0,67
C 44, n 400	0,09
C 44, n 430	0,4.

Le nombre total de sphérules dénombrées était :

sphérules très magnétiques : 3 776

sphérules peu magnétiques : 15 368

par conséquent, les sphérules très magnétiques représentent en moyenne environ 25 % du nombre total des sphérules.

Etabli pour un plus grand nombre de sphérules, dans différents niveaux de la carotte de l'Océan Indien, ce rapport des sphérules très magnétiques à la totalité des sphérules était égal à 28,5 %. On peut donc considérer qu'aux erreurs d'expériences près ce rapport est en moyenne le même.

La carotte CL 42 a été prélevée dans le Lac Léman à 4 km dans le Nord Ouest de Thonon. La vitesse de sédimentation de cette carotte, mesurée par la méthode du carbone-14 par Mme G. DELIBRIAS est 50 cm/1 000 ans.

Pour mieux suivre les variations en fonction du temps, nous avons effectué un prélèvement tous les dix centimètres, c'est-à-dire un prélèvement tous les deux siècles. Ces prélèvements ne représentent cependant pas exactement la valeur moyenne pendant ces deux siècles, le sédiment n'étant pas homogénéisé. Or, comme nous l'avons vu dans les mesures sur la carotte de glace polaire, il existe des variations beaucoup plus rapides, mais il n'est pas possible de les mesurer dans une carotte de sédiment. Le problème principal dans notre cas était de chercher à savoir si les variations lentes (de l'ordre de deux siècles) pouvaient être corrélées avec les variations climatologiques du quaternaire récent.

La figure 28 donne les variations du nombre des sphérules très magnétiques par gramme de sédiment en fonction de la profondeur de la carotte. Le nombre moyen est 1 665 sphérules très magnétiques par gramme de sédiment. Comme nous l'avons vu ce nombre ne représente que 25 % du nombre total de sphérules. Il y a donc en

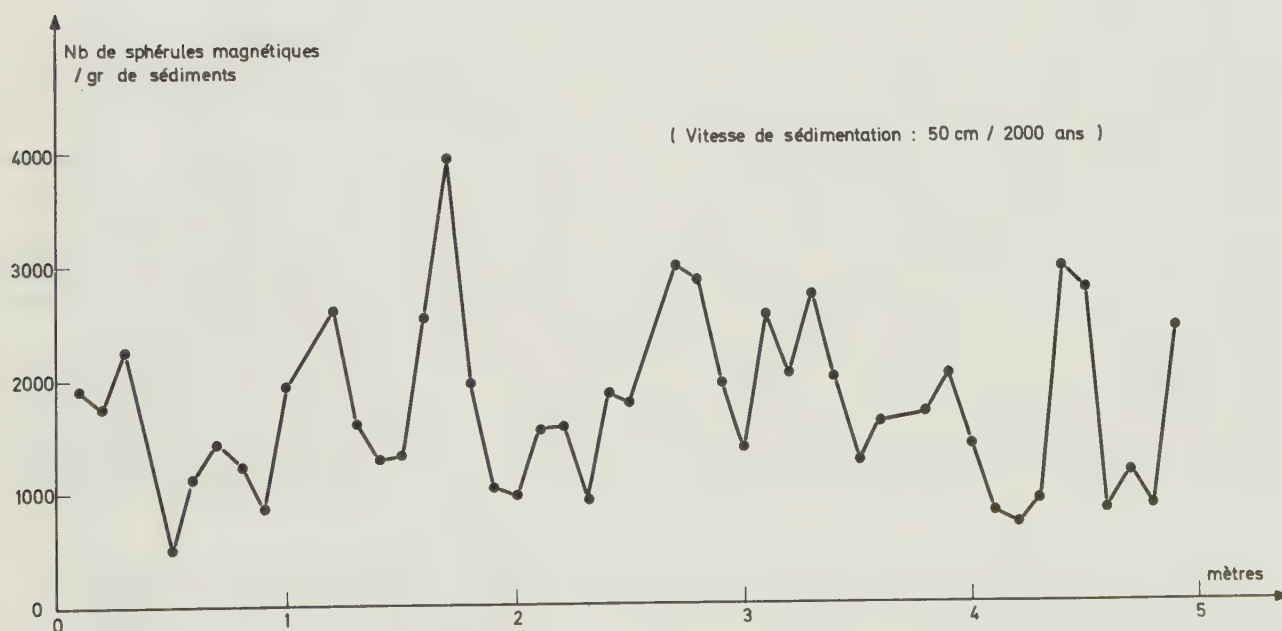


Figure 28 - Sphérules magnétiques - Lac Léman.

moyenne 6 650 sphérules par gramme de sédiment dans le Lac Léman. Ceci nous amène à conclure que le nombre de sphérules par gramme de sédiment dans un lac tel que le Lac Léman est beaucoup plus important que dans les sédiments marins (370 pour la Méditerranée.

Si la corrosion marine n'était pas le facteur dominant, on devrait au contraire trouver plus de sphérules par gramme dans la mer où le taux de sédimentation est plus lent. Si l'on voulait attribuer ce plus grand nombre de sphérules à un apport fluvial nous devons remarquer que la sédimentation méditerranéenne, avec 10 cm/ 1 000 ans est également en partie d'origine fluviale, et, tout comme dans le Lac Léman, avec ces sédiments devraient arriver des sphérules fossiles, le rapport sphérules/sédiment devrait donc être au moins constant.

Il semble donc que, pour expliquer cette abondance près de vingt fois supérieure du nombre de sphérules dans le Lac on soit obligé d'invoquer les phénomènes de corrosion chimique ou biologique qui détruisent les sphérules dans le milieu marin. Moins l'enfouissement est rapide, plus il y a de chance que cette destruction ait lieu.

Sur le tableau 14 sont portées les variations du nombre des sphérules noires très magnétiques dans la carotte CL 42 en fonction de la profondeur. Il est curieux de noter que, le taux d'accumulation du sédiment étant de 50 cm par an, il semble y avoir un minimum tous les 1 000 ans.

Tableau 14

Nombre de sphérules noires très magnétiques dans la carotte CL 42.

Niveau en cm	10	20	40	50	60	75	85	95	100	
Nombre par gramme	1 894	1 736	2 252	546	1 128	1 470	1 232	419	1 910	
Niveau en cm	120	130	140	150	160	170	180	190	200	
nombre par gramme	2 650	1 602	1 342	1 374	1 286	3 896	1 992	1 004	994	
Niveau en cm	210	220	230	240	250	260	270	280	290	
Nombre par gramme	1 522	1 576	892	940	1 738		2 656	2 700	1 880	
Niveau en cm	300	310	320	330	340	350	360	380	390	
Nombre par gramme	1 440	2 536	2 024	2 716	2 000	1 288	1 634	1 704	2 020	
Niveau en cm	400	410	420	430	440	450	460	470	480	490
Nombre par gramme	1 440	856	804	944	2 852	2 796	816	1 176	860	2 424

Il est encore trop tôt pour distinguer si cette diminution apparente est le reflet d'un phénomène réel de diminution du flux, ou si elle n'est que le reflet d'une plus grande pluviosité entraînant des taux de sédimentation plus rapides, donc un nombre relatif de sphérules plus petit en raison du phénomène de dilution. Il

n'en reste pas moins vrai que l'on a là une indication intéressante sur une possibilité d'étude nouvelle.

Quantité de matière cosmique

La vitesse de sédimentation ayant été déterminée pour la région où a été prélevée la carotte dans le Lac Léman (50 cm/1 000 ans) le nombre moyen de sphérules par gramme de sédiment nous conduit à une accumulation de : $1,8 \text{ sphérule/cm}^2 \text{ jour}$ soit pour une taille moyenne de 6 micron à 4.10^5 tonnes/Terre an.

Comparaison avec le nombre de sphérules tombant actuellement sur le Lac

Deux expériences complémentaires ont été effectuées en vue de déterminer quel était le nombre de sphérules magnétiques tombant actuellement sur le Lac, et dans une troisième expérience on a tenté de déterminer quel était le rapport de ce nombre de sphérules au poids total des retombées.

Des plaquettes de verre enduites de graisse silicone ont été exposées journellement sur le bord du Lac, à l'extrémité de la jetée de la station hydrologique de Thonon d'une part, et d'autre part sur des toits de la station du téléphérique de l'Aiguille du Midi à 3 800 mètres d'altitude.

Après un temps d'exposition de 24 heures, la surface exposée était recouverte d'une lame couvre-objet. La surface située sous ce couvre-objet ($5,7 \text{ cm}^2$ dans le premier cas et 7 cm^2 dans l'autre), était ensuite examinée au microscope et les sphérules noires étaient dénombrées. Ces comptages, résumés dans les tableaux 15 et 16 ont montré pour la station de Chamonix un taux moyen de retombée de $1,9 \text{ sphérule par centimètre carré et par jour}$ et pour Thonon un taux moyen de retombée de $1,5 \text{ sphérule par centimètre carré par jour}$, donc des taux très voisins de ceux établis pour le Lac Léman par l'étude des sédiments ($1,8 \text{ sphérules/cm}^2 \text{ jour}$).

Pour la station de Thonon où les plaquettes étaient exposées dans un jardin sur le bord du Lac, certaines plaquettes présentaient des sphérules noires très petites, de l'ordre de 5 microns, agglomérées entre elles. La présentation des plaquettes interdisant tout essai micro-chimique sur ces sphérules il ne nous a pas été possible, en particulier de savoir si on était en présence de spores très fines ou d'une autre contribution biologique. La petite taille de ces sphérules les excluait des comptages, mais leur origine étant douteuse nous les avons quand même reportées sur une courbe (figure 29) pour voir si l'on n'était pas en présence d'une contribution spéciale qui aurait pu provenir de l'averse des Perseides (la mesure étant effectuée au mois d'août) et dont la descente dans l'atmosphère aurait été accélérée par une agglomération dans des gouttelettes d'eau. Mais, dans ce cas, il faudrait expliquer l'absence de ce pic à la station de l'Aiguille du Midi par le fait que les gouttelettes de pluie y sont remplacées par des flocons de neige qui, même s'ils étaient tombés sur la plaquette graissée seraient balayés par le vent. Il n'est évidemment pas possible de tirer une conclusion définitive de cette première série d'observations.

Tableau 15

Nombre de sphérules recueillies à la Station de l'Aiguille du Midi
(Chamonix) en août 1965.
(Plaques graissées de surface 7 cm^2).

Date	Nombre de sphérules	Durée du prélèvement (en jours)	Nombre moyen par jour et par cm^2
9 - 10 août	14	1	2
10 - 11	cassé	1	
11 - 12	14	1	2
12 - 14	cassé	2	
13 - 14	21	1	3
14 - 15	14	1	2
15 - 16	5	1	0,7
16 - 17	27	1	3,8
17 - 18	2	1	0,3
Moyenne	~ 14		1,97

Tableau 16

Nombre de sphérules recueillies à la station de Thonon les Bains
en août 1965
(Plaques graissées de surface $5,7 \text{ cm}^2$)

Date	Nombre compté de sphérules 6	prélèvement	Nombre moyen par jour et par cm^2	Moyenne des comptages des sphérules de $>6\mu$ et sans amas
9 - 10 août	10	1	1,6	1,6
10 - 12	85	2	7	7
12 - 13	10	1	1,6	1,6
13 - 17	220	4	8,5	8,5
17 - 18	347	1	58	
18 - 19	5	1	0,8	
19 - 20	8	1	1,3	1,3
20 - 23	160	3	8,9	8,9
23 - 24	543	1	91	
24 - 25	148	1	24,6	
25 - 26	108	1	18	
26 - 27	186	1	31	
Moyenne	153		21	1,5

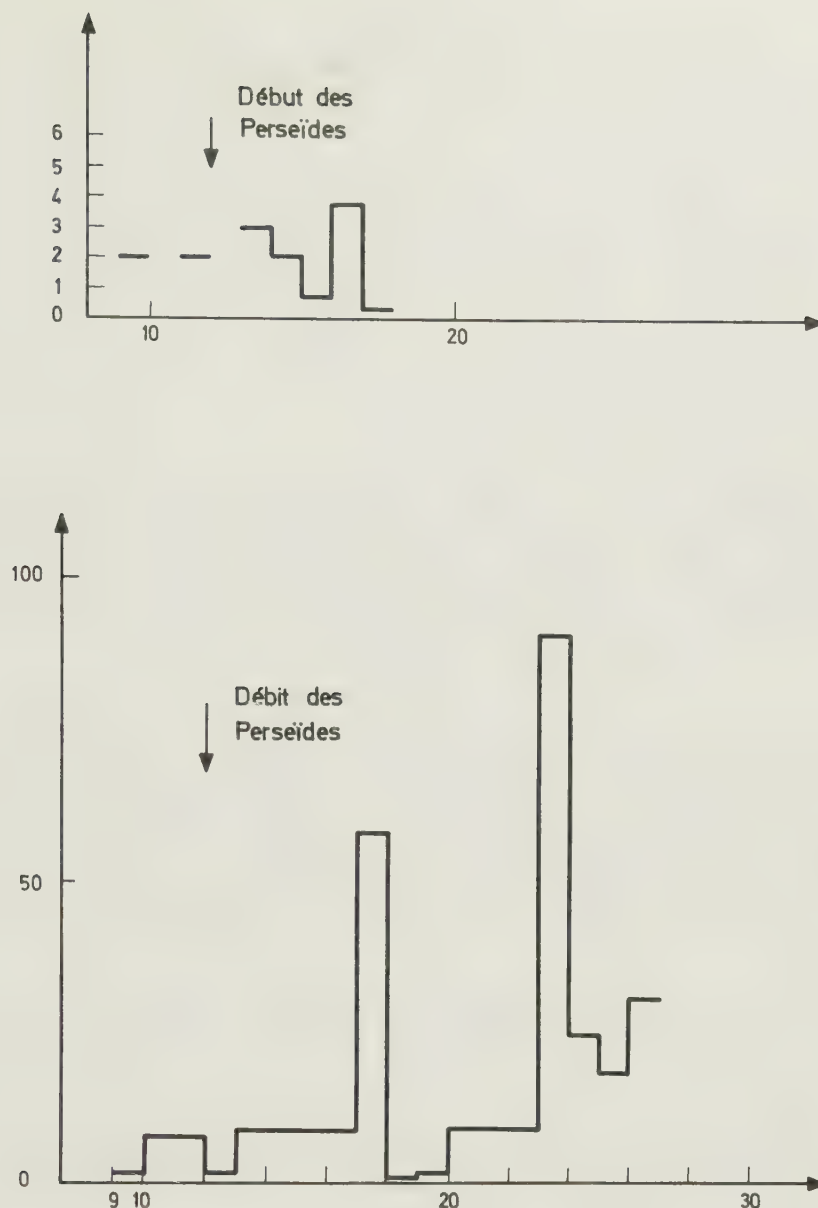


Figure 29 - Nombre de sphérules par jour/cm² tombant sur des plaques graissées
Station de Thonon les Bains - Août 1965 -

Etude des sédiments du Lac de Nantua

Pour vérifier l'hypothèse de la corrosion, nous avons effectué trois comptages de sphérules très magnétiques extraites des sédiments d'un lac à sédimentation encore plus rapide, le lac de Nantua où la vitesse de sédimentation est 2 mètres/ 1 000 ans. Cette vitesse de sédimentation a été obtenue par un comptage des varves blanches et sombres des sédiments indiquant les différentes saisons.

Les résultats des comptages sont donnés dans le tableau 17.

Tableau 17

Résultats des comptages de sphérules très magnétiques dans la carotte de sédiment du Lac de Nantua.

Profondeur (cm)	Sphérules très magnétiques par gramme de sédiment
0 à 1	3 624
5	1 920
5 à 9	2 516
Moyenne	2 680

La valeur moyenne est 2 680 sphérules très magnétiques par gramme de sédiment.

Si l'on adopte le même rapport des sphérules très magnétiques au nombre total de sphérules que nous avons utilisé dans les autres estimations, soit 1/4, le nombre moyen de sphérules pour les sédiments du Lac de Nantua devient :

10 700 sphérules/gramme de sédiment.

Le nombre de sphérules dans les sédiments lacustres dépend d'une fonction comprenant plusieurs variables indépendantes et caractéristiques de chaque site.

Soit (s) la surface totale du Lac, (S) la surface totale de collection du Lac, (P) la pluviométrie, (e) le coefficient de transport des sphérules et (e') le coefficient de transport du sédiment que nous pouvons définir comme le pourcentage entre ce qui est disponible pour l'érosion et ce qui est effectivement transporté jusqu'au Lac :

$$e = \frac{\text{Masse transportée}}{\text{Masse disponible pour le transport}}$$

La sédimentation dans des lits des rivières entrant dans le Lac Léman et le Lac de Nantua étant actuellement stationnaire, le coefficient de transport est donc égal à 1. Le coefficient de transport pour les sphérules peut par contre être inférieur à 1 en raison de leur taille plus grande.

Soit (f) le coefficient de friabilité de la roche, c'est-à-dire la quantité de roche emportée par unité de surface de roche par an, les dimensions de ce coefficient seront en gramme/m² temps.

Si (n) est le nombre de sphérules tombant du cosmos par centimètre carré et par an et dans ces conditions d'apport, la quantité de sphérules par gramme de sédiment sera :

$$N/\text{cm}^2\text{-an} = n + \frac{n S e}{S} = \frac{n s + n S e}{S}$$

La quantité de sédiment arrivant dans le même temps dans le Lac sera :

$$M/\text{cm}^2\text{-an} = \frac{S e' f}{S}$$

Donc :

$$\frac{N}{M} = \frac{n (s+Se)}{S e' f}$$

la vitesse de sédimentation étant $V = S e' f$, en mètre de sédiment par 1 000 ans.

Dans une première hypothèse, nous pouvons supposer (e) et (e') très voisins :

$$V = \frac{s}{S e f}$$

$$\frac{N}{M} = \frac{n s}{S e f}$$

$$\frac{N}{M} = \frac{ns}{v} + \frac{n}{f}$$

Si la vitesse de sédimentation est très grande, le premier terme tend vers zéro et la concentration de sphérules dans le sédiment doit tendre vers une valeur $\frac{n}{f}$. Si la vitesse est très grande il faut considérer également la contribution des sphérules fossiles qui peuvent arriver avec les sédiments donc on devrait avoir une valeur asymptotique $\frac{n}{f}$. La connaissance exacte de (f) devrait alors permettre de remonter à (n) connaissant (N) expérimentalement. Mais (f) peut aussi être estimé d'après la masse totale des sédiments qui arrivent dans le Lac.

Il est donc intéressant de voir que l'on peut faire des estimations sur la quantité de retombée cosmique, même pour des milieux à sédimentation rapide, et qu'il n'est pas exclu que, dans l'avenir, des estimations probablement plus précises pourront être faites, justement à partir de ces gisements à sédimentation rapide où la principale inconnue, la corrosion, qu'on ne pourra jamais totalement apprécier est minimale (voir tableau 18).

Tableau récapitulatif 18

	Nombre par gramme	Nombre de sphérules par cm ² /j	Masse des sphérules en gramme/m ² an 6 microns	Masse accrétée pour la Terre et tonne/an 6 microns
Vig 20 Océan Indien	1 086	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^2$
Mer Méditerranée				
C 13	269	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^3$
C 14	377	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^3$
C 24	465	$2,55 \cdot 10^{-2}$		
Lac Léman C 42	6 650	1,82	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^5$
Lac de Nantua	10 700	11,7	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^6$

Lieu	Vitesse de sédimentation	g/m ² -an	Nb. de sphé- rules/g de sédiment	Nombre de sphérules par m ² par an
Océan Indien	1,5 mm	3	1 086	3 260
Méditerranée	100 mm	200	269	54 000
			377	75 000
			465	93 000
Lac Léman	500 mm	1 000	6 650	6 650 000 (y compris
Lac de Nantua	2 000 mm	4 000	10 700	42 800 000 (les apports (des fleuves

Comparaison du nombre de sphérules dans les trois types de sédiments

Si l'on trace une courbe du nombre de sphérules par gramme de sédiment, en fonction de la vitesse de sédimentation, toutes choses égales par ailleurs, on devrait avoir des valeurs plus élevées du nombre de sphérules par gramme de sédiment pour les vitesses de sédimentation les plus lentes, en effet, seul l'effet de dilution due aux éléments terrigènes aurait une importance. En fait si l'on trace cette courbe à partir de nos mesures (figure 30) on constate, en général, le phénomène inverse qui nous indique que le phénomène prépondérant doit être une disparition des sphérules par corrosion lorsque les vitesses de sédimentation sont très lentes, les sphérules n'étant pas protégées des agents chimiques par un recouvrement rapide de sédiment. Ceci est déjà très visible lorsqu'on compare les valeurs trouvées dans deux milieux d'activité chimique très différente, le milieu marin très actif et le milieu lacustre très peu actif. Toutefois, on constate que pour un même milieu, le phénomène est plus complexe, en effet, on trouve un nombre de sphérules plus élevé par gramme de sédiment dans l'Océan Indien que dans la Méditerranée. Ceci nous indique que, dans la Méditerranée comme dans l'Océan Indien, la corrosion atteint une valeur maximale et donc qu'elle n'intervient plus pour faire varier le nombre de sphérules, seul intervient le phénomène de dilution et ceci nous ramène donc au cas théorique simple. Ceci est par ailleurs confirmé, en Méditerranée par l'anticorrélation que nous avons déjà notée entre le nombre de sphérules par gramme de sédiment et la fraction grossière que l'on considère comme représentative de l'apport terrigène. Ce même raisonnement devrait pouvoir être appliqué aux sédiments lacustres, or on voit sur la courbe que pour le Lac de Nantua qui a une plus grande vitesse de sédimentation on a plus de sphérules par gramme de sédiment. Il n'est pas possible de faire intervenir les phénomènes de corrosion plus poussés dans le Lac Léman que dans le Lac de Nantua, il est donc nécessaire de tenir compte d'autres facteurs qui deviennent alors prépondérants, et spécialement la collection par l'érosion du bassin versant comme nous l'avons montré au paragraphe précédent. Ces facteurs en fait empêchent de faire des estimations à partir de ces gisements puisque la surface du bassin de collection nous est inconnue et ne peut être qu'appréciée ainsi que les différents coefficients de transport que l'on est obligé de faire intervenir dans les équations.

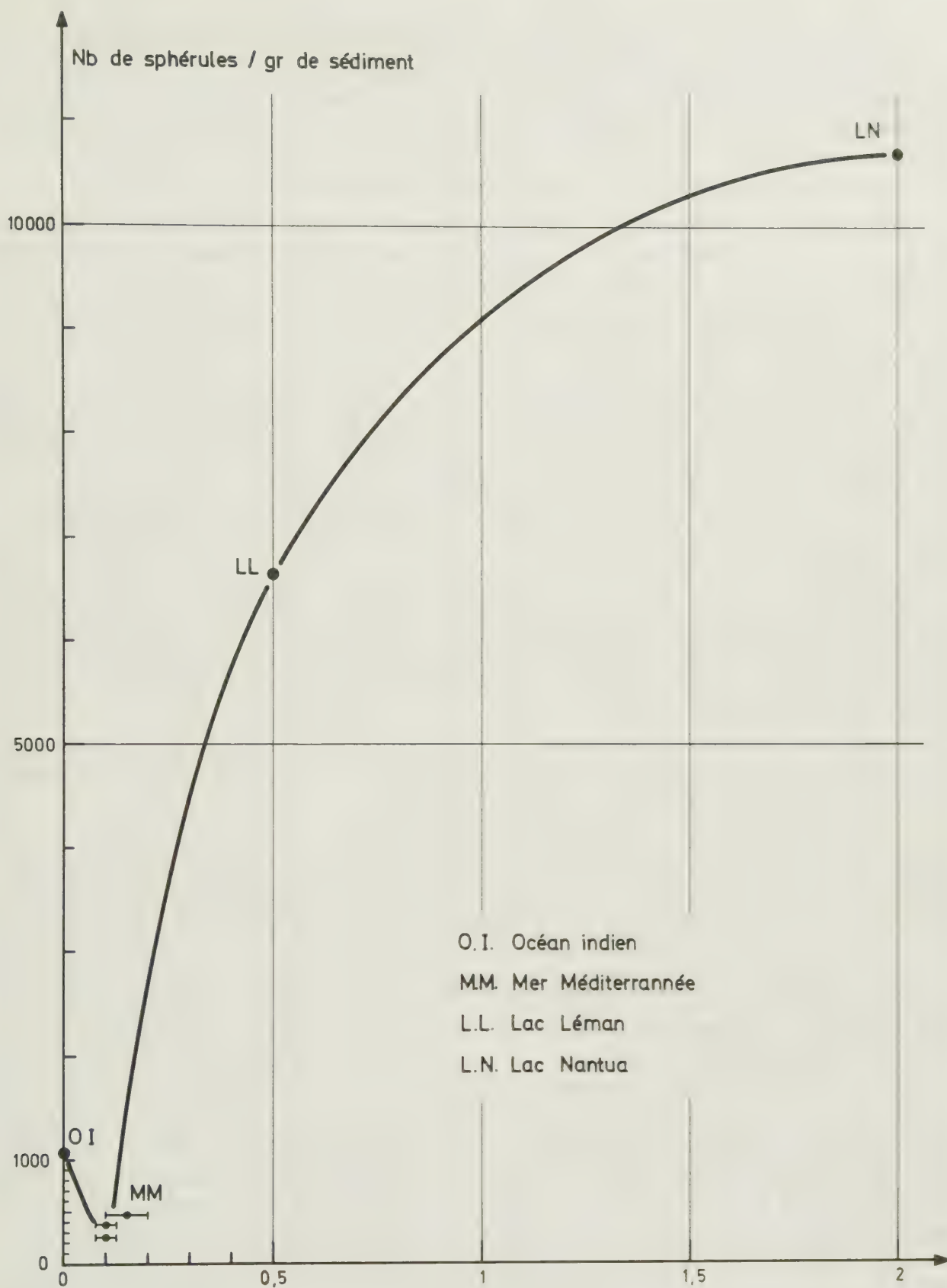


Figure 30 - Vitesse de sédimentation : 1 m/1 000 ans.

CRITIQUE DE LA METHODE DE COMPTAGES

Dans un certain nombre de méthodes d'évaluation de la quantité de matière cosmique arrivant annuellement sur Terre que nous venons de voir aux chapitres précédents, nous avons utilisé des méthodes de comptage au microscope des sphérules. L'énorme avantage de cette méthode réside dans le fait que c'est, pour le moment, la seule méthode qui nous garantisse l'authenticité cosmique du matériau *).

Mais les inconvénients de cette méthode sont multiples :

1° - On ne travaille que sur une zone granulométrique étroite puisqu'on ne compte que les grosses sphérules, or elles ne sont pas statistiquement parlant représentatives, on ne tient pas compte de la contribution des petites sphérules.

2° - Les sphérules ne sont qu'une des formes de la poussière cosmique, et très probablement une forme minoritaire.

3° - En dehors des gisements polaires, les gisements marins et lacustres présentent l'incertitude due à la corrosion, et celle-ci est très importante. Or il n'est pas possible de se limiter à l'étude des gisements polaires car il n'y a aucune raison de penser que le flux de poussière cosmique est isotrope.

4° - La méthode de comptage introduit des erreurs personnelles considérables. Comme les variations d'un niveau à l'autre sont très importantes pour obtenir une valeur moyenne, il est nécessaire de travailler sur de très nombreux échantillons. Il faut par conséquent effectuer les comptages assez rapidement ce qui ne permet pas d'examiner avec attention chaque sphérule. On a très certainement tendance, même si le microscope est équipé d'un micromètre, à compter des sphérules plus petites que la taille minimale qu'on a établie, lorsqu'elles sont parfaitement sphériques et brillantes.

Dans les estimations de masse, les erreurs de dimensions interviennent comme le cube, ce qui peut introduire une grande erreur. Il n'est donc possible à partir de ces mesures que de donner un ordre de grandeur.

5° - Enfin, le principal inconvénient apparaît dans le principe même de la méthode, à moins de se trouver dans une zone où la corrosion devient importante. En effet, il y a deux phénomènes compétitifs, l'apport de sphérules et la retombée directe, or le premier terme n'est absolument pas négligeable. Cette indétermination

* HODGE et WRIGHT (1964) et FREDRICKSON (1963) ont suggéré qu'il pouvait y avoir également des sphérules d'origine volcanique. Les études qui ont été menées par la suite ont montré une différence de composition moyenne entre ces sphérules et les sphérules trouvées dans les gisements polaires, donc ont fait croire à une origine différente. En fait, lorsqu'on examine en détail les conditions de prélèvement des sphérules dans les roches volcaniques, on voit que ces sphérules ont pu aussi bien être introduites dans ces roches par les précipitations météoritiques et que ce ne sont en réalité que des sphérules cosmiques. L'érosion de ces sphérules dans des roches superficielles étant beaucoup plus importante que celle des sphérules contenues par exemple dans la neige, doit, par ailleurs être rendue responsable de la différence de composition chimique moyenne. En effet, dans ces conditions, seules résistent les structures les plus stables c'est-à-dire les alumino-silicates.

existe de la même manière pour les déterminations faites à partir de comptages de sphérules dans des dépôts de sel, elle y joue cependant un rôle moindre, l'apport devant être minime car les eaux arrivant ne sont théoriquement chargées uniquement qu'en ions, les sédiments et les sphérules étant déposés avant le gisement final.

Chapitre 8

DETERMINATION DE LA MASSE ACCRETEE PAR LA TERRE PAR L'ANALYSE CHIMIQUE DES SEDIMENTS OCEANIQUES

I - PRINCIPE DE LA METHODE

Aucun corps du système solaire ne semble avoir exactement la même composition chimique. Certains gisements comme les sédiments océaniques ou les glaces polaires ne reflètent pas plus la composition moyenne de la Terre que celle du Soleil. Ces différences de compositions chimiques peuvent être expliquées soit par des concentrations préférentielles de certains éléments, soit par des apports extra-terrestres d'un matériau d'une autre composition chimique, car les concentrations préférentielles ne peuvent pas toujours expliquer les excès que l'on rencontre pour certains éléments, soit parce que nous ne connaissons aucun phénomène théorique permettant d'expliquer ces concentrations, soit parce que l'étendue des gisements exclut la possibilité de concentration sélective, c'est par exemple le cas du nickel dans les sédiments océaniques.

On peut déterminer directement le surplus d'un élément considéré dans un sédiment, mais lorsqu'on veut transformer cette valeur en une masse de matière d'origine extra-terrestre, il est nécessaire d'adopter un modèle de composition chimique pour la poussière.

II - CHOIX DES MODELES

Etant donné le manque d'informations expérimentales directes que nous avons sur la composition de la poussière cosmique, nous devons choisir entre les compositions chimiques des sphérules, des météorites et de l'atmosphère solaire qui peuvent toutes trois être à l'origine de la poussière cosmique.

a) - Le modèle des sphérules

L'origine cosmique des sphérules n'a pas encore été totalement établie, cependant, les sphérules ont été les premières poussières attribuées au cosmos parce que, nulle part dans la minéralogie terrestre on ne connaissait de telles formes en dehors de quelques accrétions biologiques. Une origine volcanique leur a parfois été attribuée, nous y reviendrons par la suite.

La composition chimique moyenne des sphérules ne peut être établie qu'à partir de statistiques d'analyses de particules individuelles identifiées au microscope comme sphérules puis analysées à la microsonde électronique.

Regroupement qualitatif

Dans le tableau 19 on a regroupé les analyses en fonction des éléments principaux présents par sphérule de façon à voir si les associations d'éléments que l'on trouve sont identiques ou différentes de celles que l'on trouve dans les minéraux terrestres.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

1° - Les teneurs sont très variables d'une sphérule à l'autre, quel que soit l'élément considéré, et lorsque des analyses en coupe ont été effectuées, les teneurs en divers éléments sont très variables à l'intérieur d'une même sphérule.

2° - Par rapport au nombre de sphérules analysées, la variété de composition est très grande, il y a en moyenne 3,5 sphérules par case, et la répartition ne semble pas gaussienne.

3° - Les formules complexes sont très fréquentes, et les éléments sidérophiles, calcophiles et lithophiles sont mélangés, beaucoup de formules n'ont pas d'équivalents minéralogiques terrestres.

4° - Beaucoup de formules de sphérules sont incompatibles avec des formules minérales terrestres parce qu'elles ne contiennent pas assez d'aluminium qui est généralement présent à quelques pour cent dans les minéraux terrestres complexes. Pour cette raison, les valeurs de la colonne 3 ne sont pas compatibles avec les valeurs des minéraux terrestres.

5° - Certaines associations apparaissent comme totalement anormales, c'est le cas des associations contenant du soufre.

6° - Les formules des minéraux terrestres les plus abondants sont absentes : il n'y a pas de quartz, les feldspaths sont très peu fréquents sinon absents alors que ce sont les minéraux les plus abondants de la croûte terrestre, en effet, les sphérules de la colonne 5 contiennent trop de fer pour que leur formule soit compatible avec celle des feldspaths.

Par conséquent, il semble bien que les sphérules n'obéissent pas aux lois de la géochimie terrestre où, dans un milieu aqueux, sous une pression de au moins une atmosphère et à la température de la croûte terrestre, on aboutit à une ségrégation des éléments en associations sidérophiles, calcophiles et lithophiles.

Si la composition chimique des sphérules est régie par d'autres lois, celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente, cette composition est donc peut-être le résultat d'une formation directe dans l'espace interplanétaire ou intersidéral. A cet égard, plusieurs auteurs (CASSIDY, 1963, etc...) ont souligné que le nombre de possibilités d'associations d'éléments dans le vide était beaucoup plus grand qu'on ne l'avait cru antérieurement.

Certains auteurs ont cru pouvoir proposer une origine volcanique des sphérules : HODGE, WRIGHT et FREDRIKSON (1964) et (1963) ont signalé des sphérules dans des tufs volcaniques. Cependant, étant donné d'une part le mode de prélèvement qu'ils ont utilisé et d'autre part la description des gisements, il est clair que ces tufs, déposés en couches n'excédant pas 5 cm d'épaisseur, étaient exposés depuis suffisamment longtemps aux intempéries et aux retombées atmosphériques pour que la seule contribution de sphérules cosmiques arrivant par la voie atmosphérique puisse être rendue responsable des teneurs en sphérules qu'ils ont trouvées.

Afin d'éliminer cette origine possible pour les sphérules, nous avons analysé la composition chimique de particules d'origine volcanique caractérisée pour voir si on retrouvait les mêmes associations que celles trouvées pour les sphérules.

Nous avons analysé des particules recueillies par H. TAZIEFF provenant des éruptions des volcans Capelimbos (Açores, éruption d'octobre 1957) et de l'éruption du Puyehue (Chili du Sud, en mai 1960).

Les résultats de ces analyses sont les suivants :

6 Fe, Ti	13 Si	1 Al, Si	
	6 Si, Fe, Mg	1 Al, Si, K	1 Al, Si, Fe
		21 Al, Si, Ca	12 Al, Si, Fe, Ca
		1 Al, Si, Mn, K	4 Al, Si, Fe, Ca, Ti
			1 Al, Si, Fe, Ca, Mn
			2 Al, Si, Fe, Cr, Ti

Ces associations correspondent aux grandes familles minérales quartz, feldspaths, pyroxènes, et un minéral comportant du soufre qui peut correspondre à la noséane.

Une recherche plus systématique du soufre n'a montré le soufre que dans une particule sur 200 traversées avec un seuil inférieur à 1 %, on est donc très loin des statistiques des sphérules soufrées.

La même recherche spécifique pour le manganèse et pour le potassium a montré, sur 100 particules étudiées 2 particules avec un peu de manganèse et 2 avec du potassium.

Un dosage quantitatif a montré pour les particules les plus communes :

Si, Fe, Mg	{	Si 16 %	Al, Si, Ca	{	Si 20 %	SiO ₂ 43 %
		Fe 11 %			Al 16 %	Al ₂ O ₃ 30 %
		Mg 30 %			Ca 4,6 %	CaO 6,5 %

L'ensemble de ces associations volcaniques reste donc parfaitement conforme aux associations minérales terrestres.

Il ne semble donc pas possible, ni pour des raisons de gisement, ni pour des raisons de composition chimique d'assigner une origine volcanique aux sphérules.

La proposition de HODGE et WRIGHT (1964) de différencier les sphérules en aluminées et non aluminées ne peut plus être retenue en raison des processus d'exposition aux intempéries. En effet, il est logique de penser que parmi les sphérules qui subissent les attaques de l'eau de pluie et les attaques mécaniques, seules les plus résistantes subsistent. Il est donc normal de trouver une plus grande proportion de sphérules de silicates d'alumine dans les tufs volcaniques, composé particulièrement résistant, que de sphérules non aluminées, ce qui n'est pas le cas dans les neiges polaires où toutes les sphérules, n'étant pas soumises aux agents d'érosion, sont conservées.

Regroupement quantitatif

Nous avons regroupé l'ensemble des analyses quantitatives qui ont été faites sur des sphérules dont le mode de collection excluait toute différenciation ou triage particulier. Ainsi, ont été écartées toutes les analyses faites sur des sphérules extraites magnétiquement.

Après sélection, 256 analyses étaient disponibles effectuées par :

- 77 sphérules collectées dans l'Antarctique par WRIGHT et al. (1963)
et par HODGE et al. (1964).
- 14 sphérules collectées dans l'Antarctique par SCHMIDT (1963).
- 132 sphérules collectées au Groenland par WRIGHT et al. (1963),
et par HODGE et al. (1964).
- 4 sphérules collectées au Mt Rainier Glacier par WRIGHT et al. (1963).
- 6 sphérules collectées dans l'Antarctique par WRIGHT et al. (1963).
- 23 sphérules collectées dans la stratosphère par WRIGHT et al. (1963).

Toutes ces analyses ont été faites avec des microsondes électroniques en étudiant la surface des sphérules.

Les sphérules montrent de très grandes différences de composition chimique, aussi est-il indispensable de considérer la moyenne de toutes les analyses disponibles.

Les quantités minimales détectables en pratique avec les microsondes électroniques sont de l'ordre de 0,5 %. Nous n'avons donc pas pris en considération les éléments détectés à l'état de traces ou en quantités inférieures à cette limite.

Pour calculer la composition moyenne et connaître l'erreur statistique que l'on pouvait introduire, nous avons procédé de la manière suivante :

Le fer par exemple, est détecté dans 193 sphérules et n'apparaît pas dans 63 sphérules. Pour ces dernières, on peut donc formuler deux hypothèses extrêmes qui vont permettre de fixer les limites de l'erreur qui peut être commise en effectuant les moyennes arithmétiques :

1° - On peut supposer que dans les 63 sphérules où le fer n'est pas détecté, la teneur en fer est réellement nulle.

2° - On peut supposer au contraire que cette teneur était juste en-dessous de la limite de détection, c'est-à-dire < 0,5 %.

Avec la première hypothèse, la moyenne arithmétique générale donne une limite inférieure possible de la teneur de l'élément.:

les 193 cas où le fer est présent totalisant 6 267 %

la moyenne générale devient donc $\frac{6\ 267 + 0}{256} = 24,5 \%$.

Avec la deuxième hypothèse qui maximalise les possibilités d'existence de l'élément dans les cas où il n'est pas pondéralement détecté, cette moyenne devient :

$$\frac{6\ 267 \% + (63 \times 0,5 \%)}{256} = 24,6 \%$$

Comme on le voit, le fait que le fer n'a pas été détecté à sa teneur exacte dans 63 cas, ne constitue pas une interdiction pour une évaluation statistique quantitative de son abondance dans les sphérules, l'erreur statistique étant du même ordre de grandeur que les erreurs des meilleures analyses.

En procédant de la même manière, on peut établir des moyennes d'abondances maximales et minimales pour tous les éléments détectés par les microsondes, suffisamment de fois et avec des quantités telles que la correction qui doit être introduite reste dans des limites tolérables (voir graphiques 31 et 32). En fait, on peut donc établir un modèle statistique de la composition des sphérules.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 20 où les abondances des éléments sont portées en pourcentages massiques, et dans le tableau 21 où ces teneurs maxima et minima sont comparées aux roches terrestres, aux roches cristallines lunaires et aux chondrites carbonées, en normalisant l'ensemble des résultats par rapport au silicium. Les valeurs pour les chondrites carbonées sont celles de CAMERON (1968) pour la croûte terrestre celles de MASON (1966) et pour les roches cristallines lunaires celles de SCHMITT et al. (1970) MORRISON et al. (1970) MAXWELL et al. (1970) et KEAYS et al. (1970).

Les abondances normalisées par rapport au fer figurent dans le tableau 22.

Dans les figures 31 et 32, les rapports d'abondances sont comparés à ceux des chondrites carbonées, de la croûte terrestre et des roches cristallines lunaires.

Ces graphiques suggèrent les remarques suivantes :

- la valeur des rapports d'éléments pour les sphérules se situent pour la plupart des éléments analysés entre les valeurs relatives aux chondrites et aux roches terrestres,

- le calcium et les éléments lourds sont plus abondants dans les sphérules.

Il faut rappeler que ces différences d'abondances ne peuvent être expliquées par une sélection magnétique, puisque tous les cas où celle-ci avait été employée ont été rejetés.

Lescas du titane et du calcium sont très intéressants parce qu'ils se présentent exactement dans le même rapport que pour les roches cristallines lunaires.

Tableau 20

Composition moyenne de 256 sphérules.

Elément	Nombre de sphérules		Teneur moyenne en pourcentage pondéral		
	détecté	pas détecté	pourcentage dans les sphérules où l'élément a été détecté %	dans toutes les sphérules	
				minimum %	maximum %
Mg	15	241	15,0	0,9	1,4
AL	59	197	11,2	2,6	3,0
Si	164	92	13,0	8,3	8,5
S	50	206	5,6	1,1	1,5
Cl	10	246	1,5	0,06	0,5
K	21	235	2,9	0,24	0,7
Ca	102	154	8,4	3,4	3,7
Ti	62	194	7,3	1,8	2,1
Cr	40	216	3,8	0,6	1,0
Mn	27	229	2,2	0,23	0,7
Fe	193	63	32,5	24,5	24,6
Co	18	238	2,7	0,19	0,7
Ni	10	246	4,4	0,17	0,7

Tableau 21

Rapport des abondances des éléments dans les sphérules, les chondrites carbonées, les roches cristallines lunaires, la croûte terrestre.

(Normalisation par rapport au silicium).

Elément	Sphérules		Chondrites carbonées	Croûte terrestre	Roches cristallines lunaires
	minimum	maximum			
Mg	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	1,1	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$
Al	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$
Si	1	1	1	1	1
P	-	-	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
S	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Cl	$6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
K	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Ca	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$
Sc	-	-	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Ti	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$
V	-	-	$9 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Cr	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
Mn	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
Fe	1,4	1,4	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-1}$
Co	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Ni	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Tableau 22

Rapport des abondances des éléments dans les sphérules, les chondrites carbonées, les roches cristallines lunaires et la croûte terrestre.

(Normalisation par rapport au fer).

Elément	Sphérules		Chondrites carbonées	Croûte terrestre	Roches cristallines lunaires
	minimum	maximum			
Mg	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	1,2	$9,5 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$
Al	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$	3,4	$7,1 \cdot 10^{-1}$
Si	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$7,2 \cdot 10^{-1}$	1,1	1,1.10	2,8
P	-	-	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
S	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Cl	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
K	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Ca	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	1,0	$7,2 \cdot 10^{-1}$
Sc	-	-	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$
Ti	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
V	-	-	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$
Cr	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Mn	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Fe	1	1	1	1	1
Co	$8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$
Ni	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$

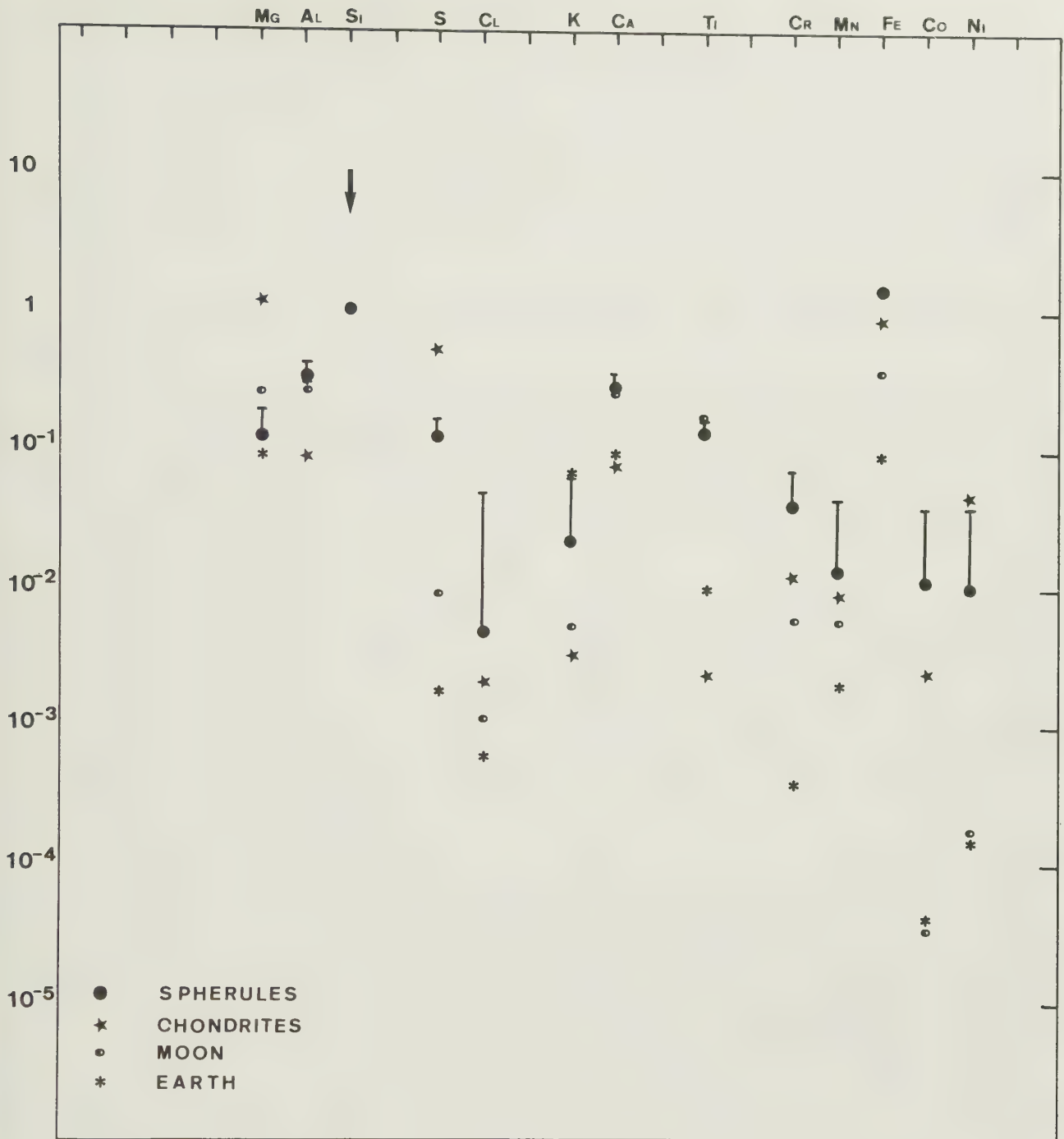


Figure 31 - Rapports de l'abondance des éléments dans les sphérules, les chondrites, la croûte terrestre et les roches lunaires (Si = 1,00).

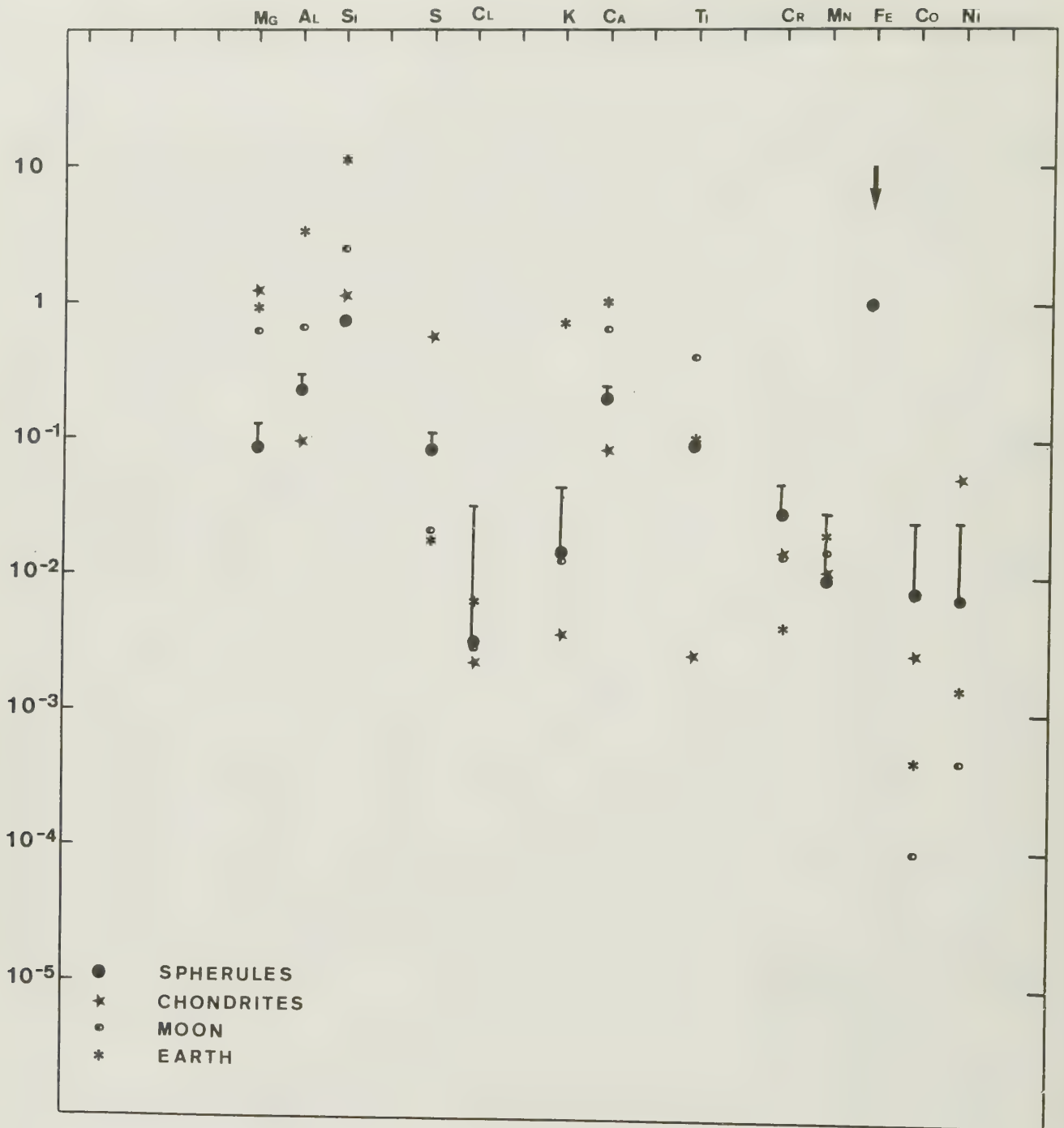


Figure 32 - Rapports de l'abondance des éléments dans les sphérules, les chondrites, la croûte terrestre et les roches lunaires (Fe = 1,00).

L'abondance du fer, par rapport au silicium fait penser que l'on se trouve en présence d'un matériau qui pourrait être produit par une sélection du type sidérophilique. Les grandes abondances du nickel et du cobalt peuvent confirmer cette observation. Mais nous ne pensons pas que cette observation est déterminante parce que si la grande abondance du fer, du nickel et du cobalt devait être expliquée par un processus de ségrégation sidérophilique, elle n'aurait pas été accompagnée par une haute abondance du titane, du chrome et du calcium qui ne sont pas des éléments sidérophiliques. Dès lors, l'explication pour ces enrichissements doit être recherchée ailleurs, soit dans une autre possibilité de ségrégation, ni aqueuse, ni fondue, soit dans une constitution plus élémentaire qui n'aurait pas été affectée par des ségrégations.

La comparaison de la composition des sphérules avec celle des chondrites carbonées (figures 33 et 34) montre en général de plus grandes analogies, sauf pour quelques cas.

La principale différence se présente pour le magnésium et le titane avec deux tendances différentes. Cependant, il faut remarquer que, en ce qui concerne les dosages du magnésium, des erreurs expérimentales d'analyse sont possibles : en effet, cet élément était, à l'époque des analyses, à la limite de détection des microsondes électroniques. Ainsi la faible teneur en magnésium a peut-être une explication expérimentale.

La comparaison avec les chondrites carbonées fait penser de prime abord, que la composition des sphérules pourrait fort bien s'expliquer par un mélange de matière lunaire et de matière chondritique (voir tableau 23). Mais un examen plus approfondi montre que cette double origine n'explique pas tous les écarts.

Sur les figures 35 et 36, la comparaison avec les abondances des éléments sur la Terre montre que la croûte terrestre est très fortement ségrégée, les rapports des éléments sur la Terre variant de plusieurs puissances de dix. La même chose peut être dite des roches cristallines lunaires (figures 37 et 38) qui montrent également de très fortes variations.

Nous avons tracé, par la méthode des moindres carrés pour chacun des graphiques, une droite qui représentait la tendance moyenne de l'évolution de l'abondance des éléments (figure 39). Nous avons mesuré ensuite les écarts réels des abondances des éléments pour chaque graphique par rapport à cette tendance moyenne. En sommant l'ensemble des carrés des écarts nous aboutissons à un nombre qui peut être représentatif, entre autres choses, du degré de ségrégation qui a affecté les éléments dans le corps considéré. Ainsi la croûte terrestre et les roches cristallines lunaires apparaissent avec de fortes sommes des carrés des écarts, 1 384 pour la Terre et 1 609 pour la Lune. Les chondrites carbonées ne totalisent que 1 154 et dénotent ainsi un degré de ségrégation bien moindre.

Il est finalement important de noter que cette somme d'écarts n'est que de 626 pour les sphérules (Tableau 24).

La somme des écarts établie pour ces quatre cas ne subit aucune modification selon que les normalisations sont faites avec le fer ou avec le silicium.

Jusqu'à présent les chondrites carbonées étaient considérées comme le matériau le moins ségrégué et le plus primitif que nous connaissions, et il faut se souvenir qu'il existe de très grandes différences entre les météorites, qu'elles soient carbonées, chondritiques ou achondritiques.

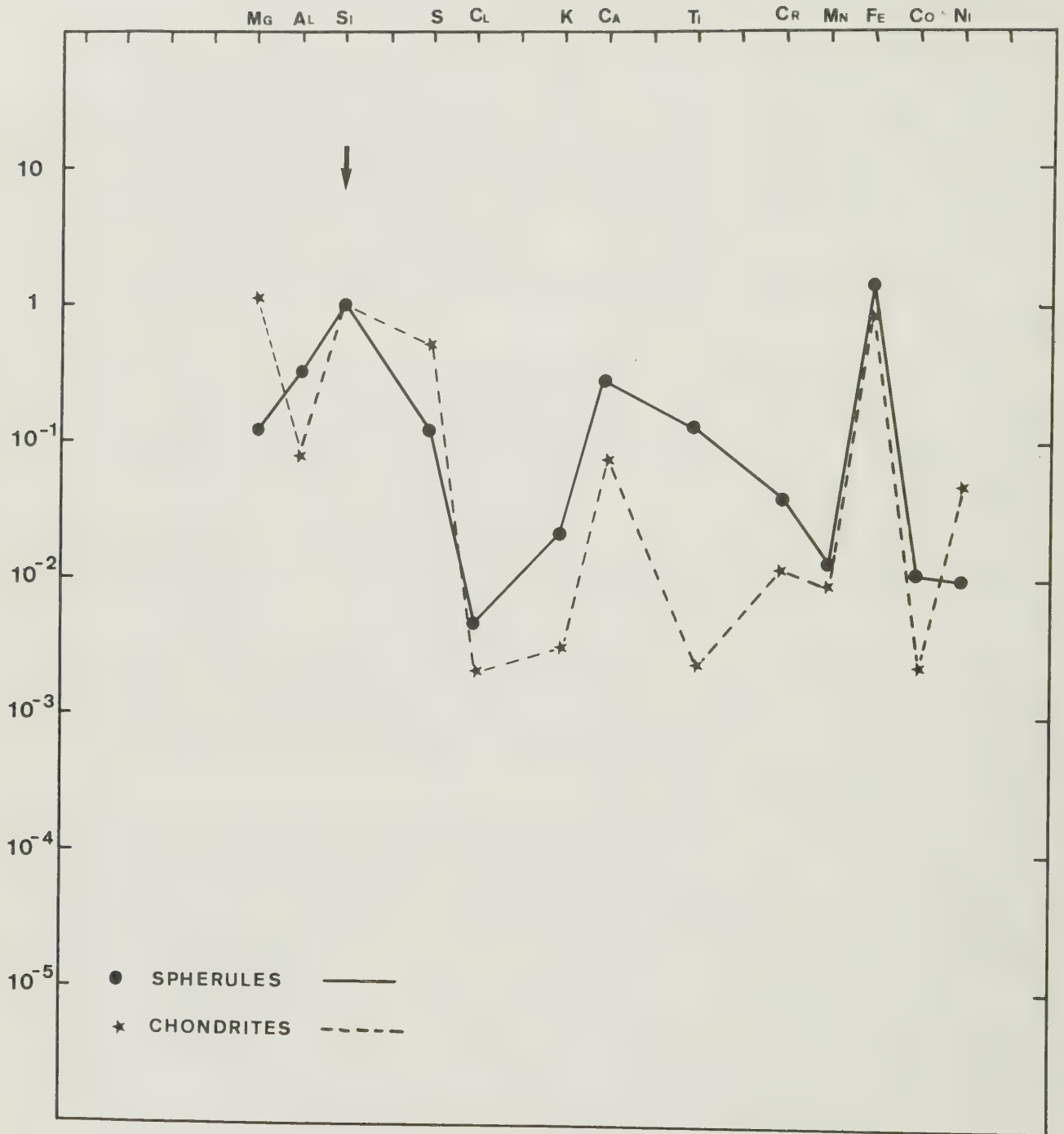


Figure 33 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et les chondrites (Si = 1,00).

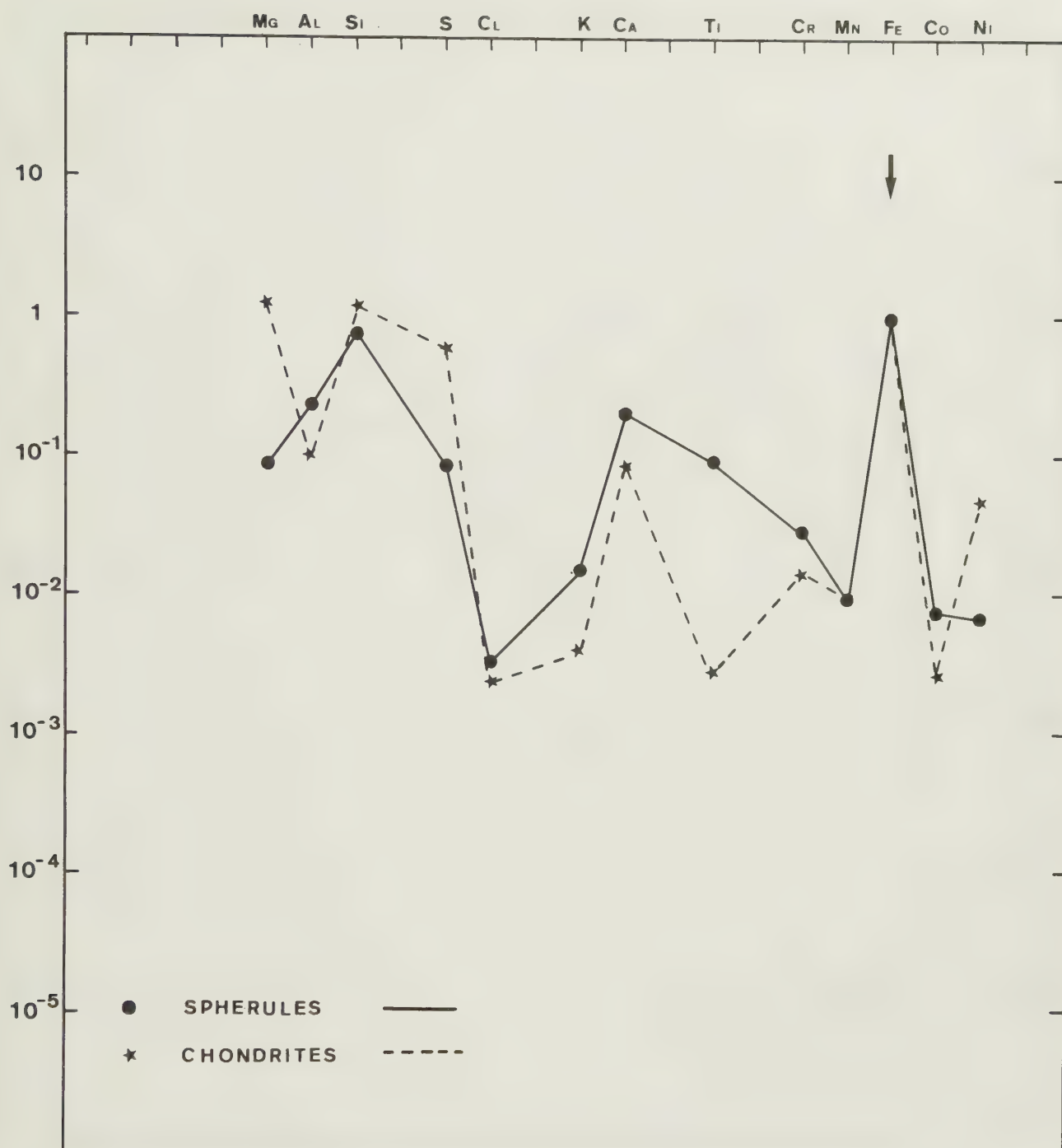


Figure 34 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et les chondrites (Fe = 1,00).

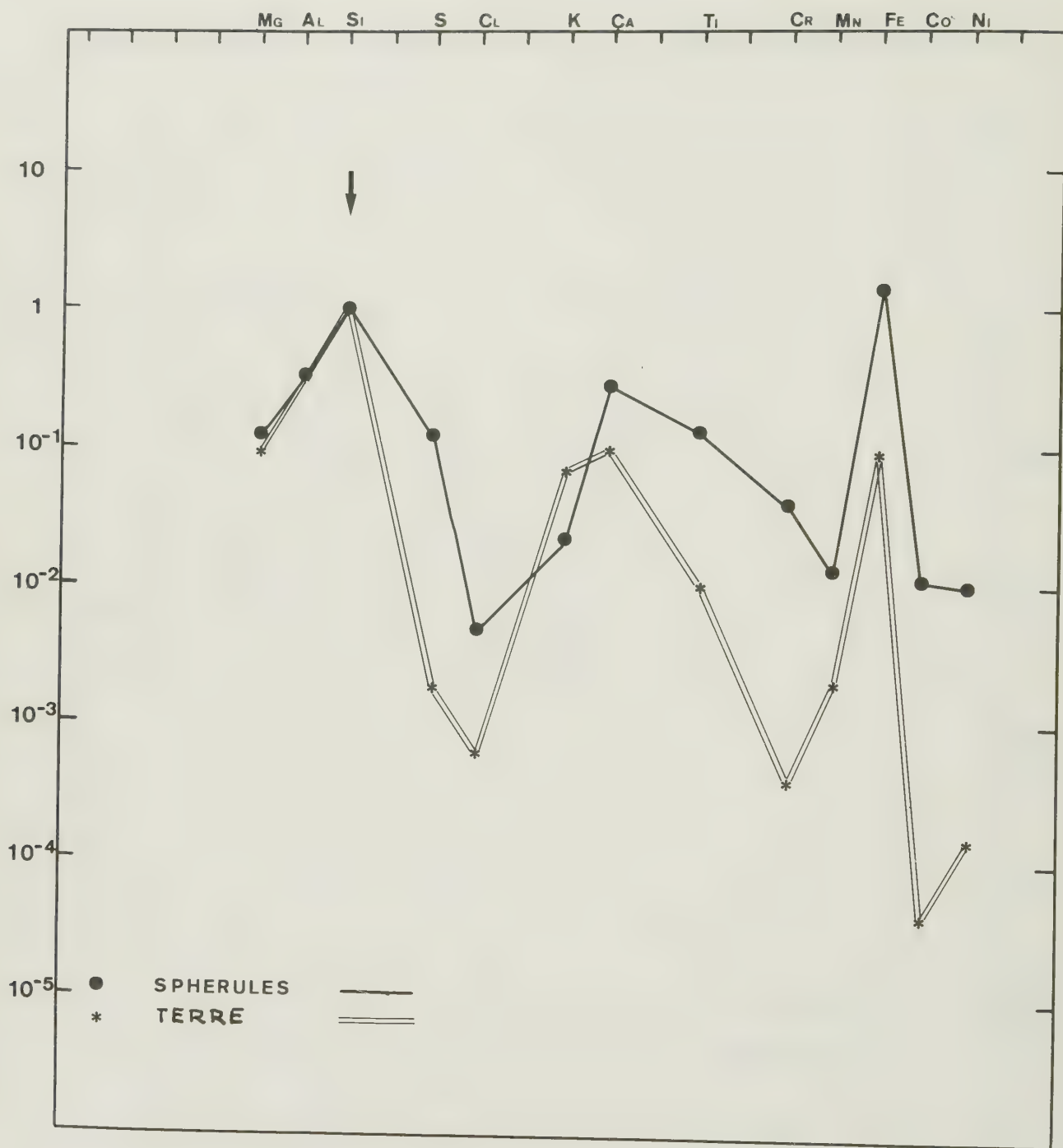


Figure 35 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et la croûte terrestre (Si = 1,00).

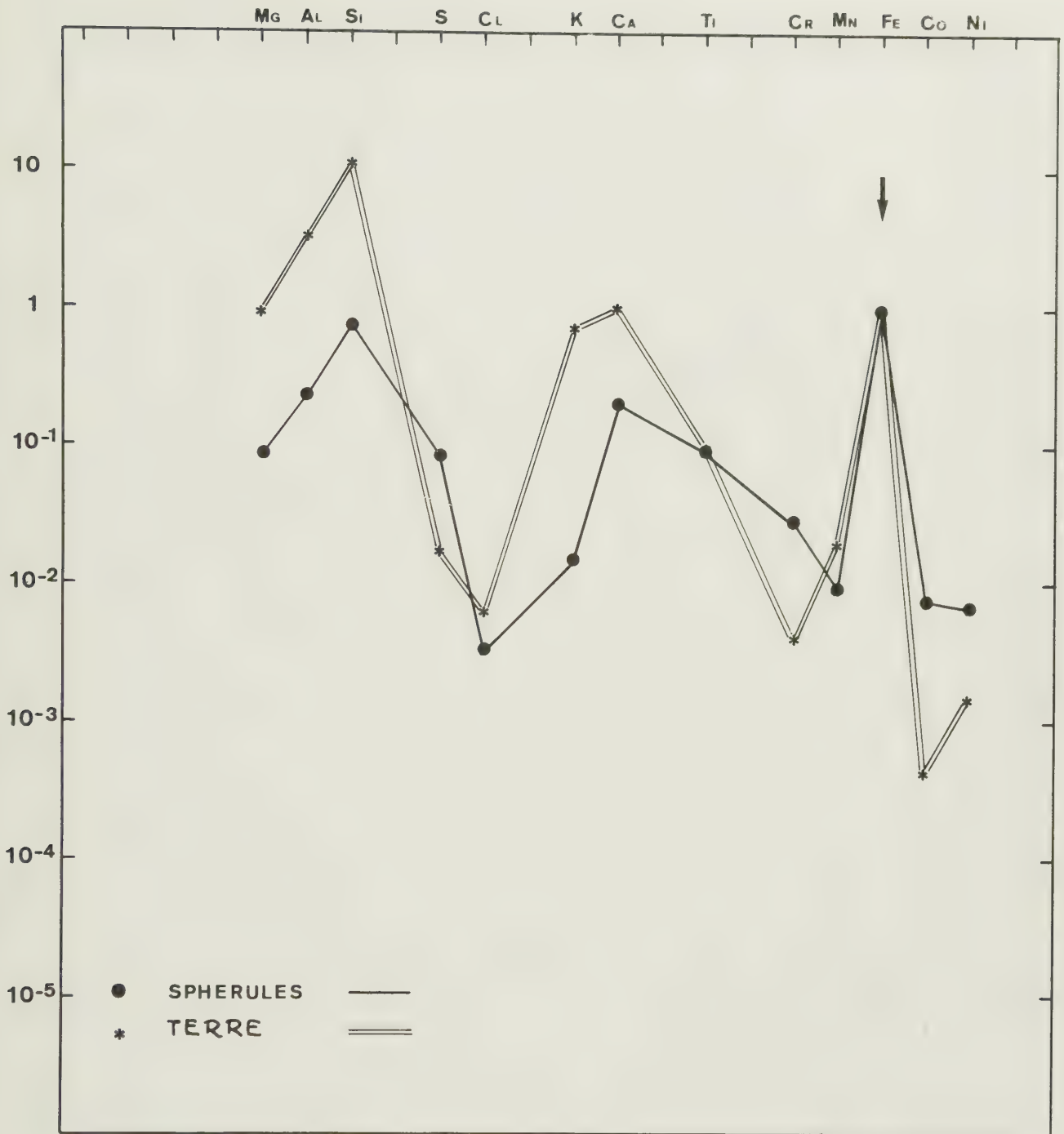


Figure 36 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et la croûte terrestre (Fe = 1,00).

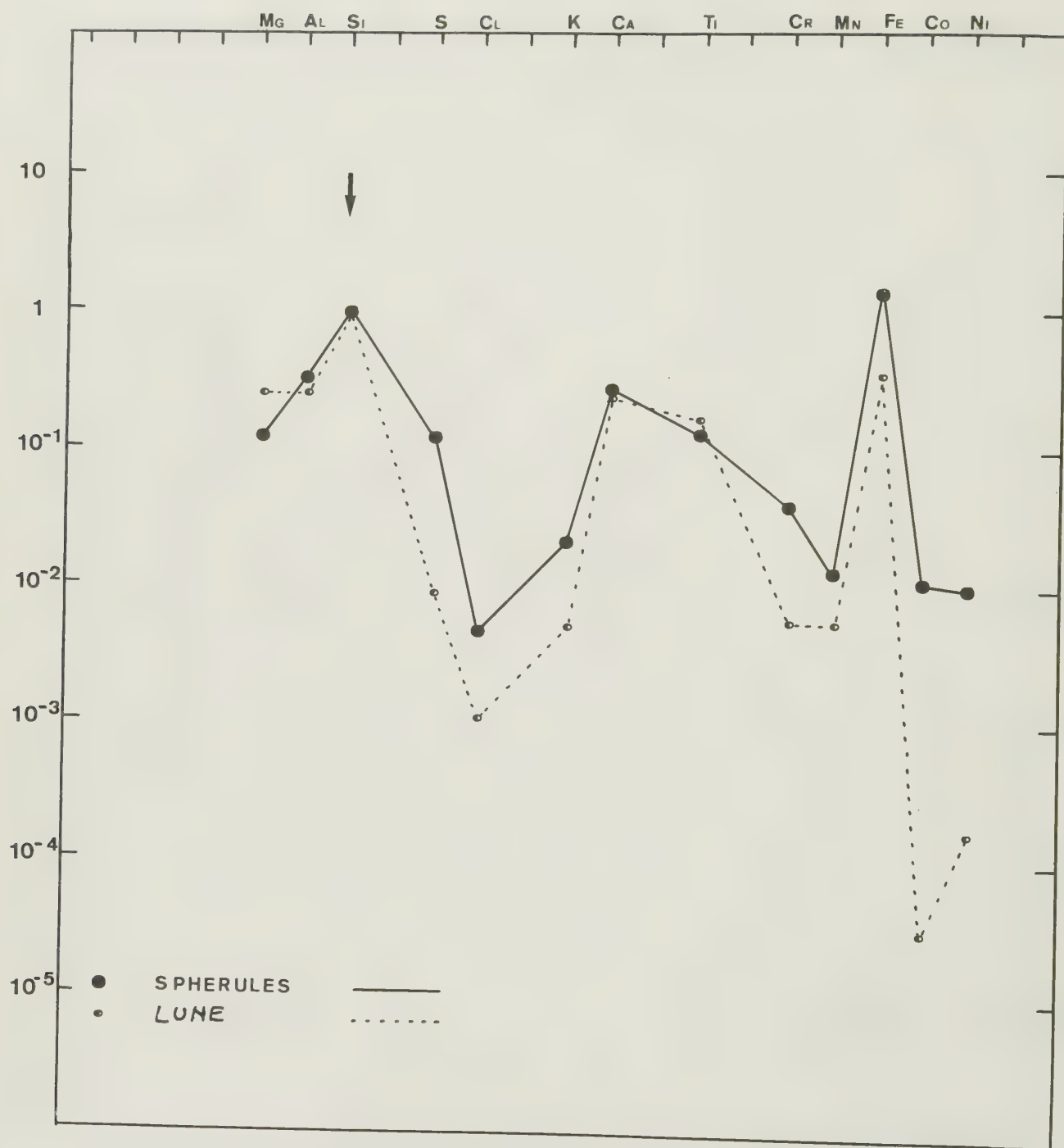


Figure 37 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et les roches lunaires (Si = 1,00).

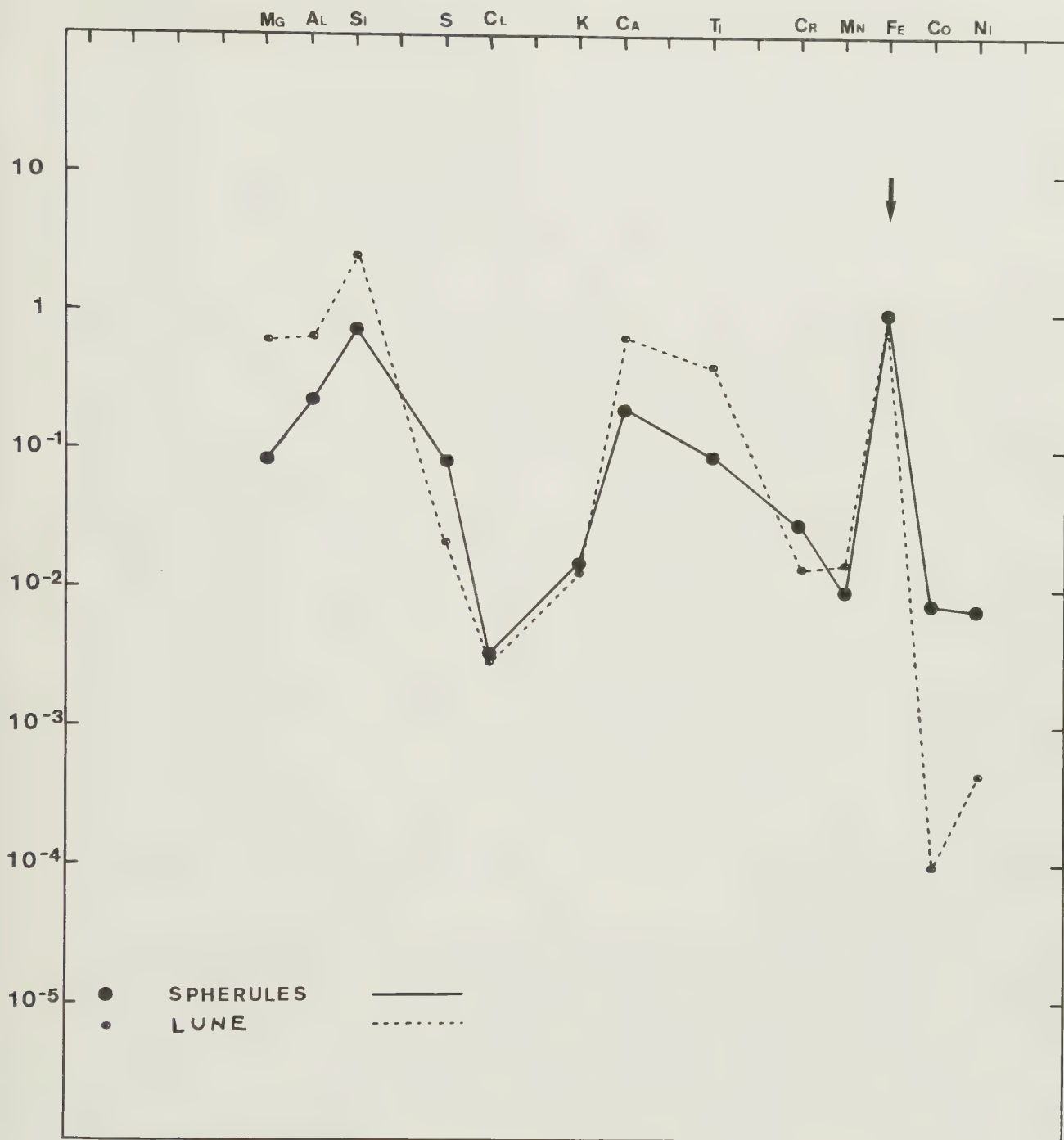


Figure 38 - Comparaison des rapports de l'abondance des éléments entre les sphérules et les roches lunaires (Fe = 1,00).

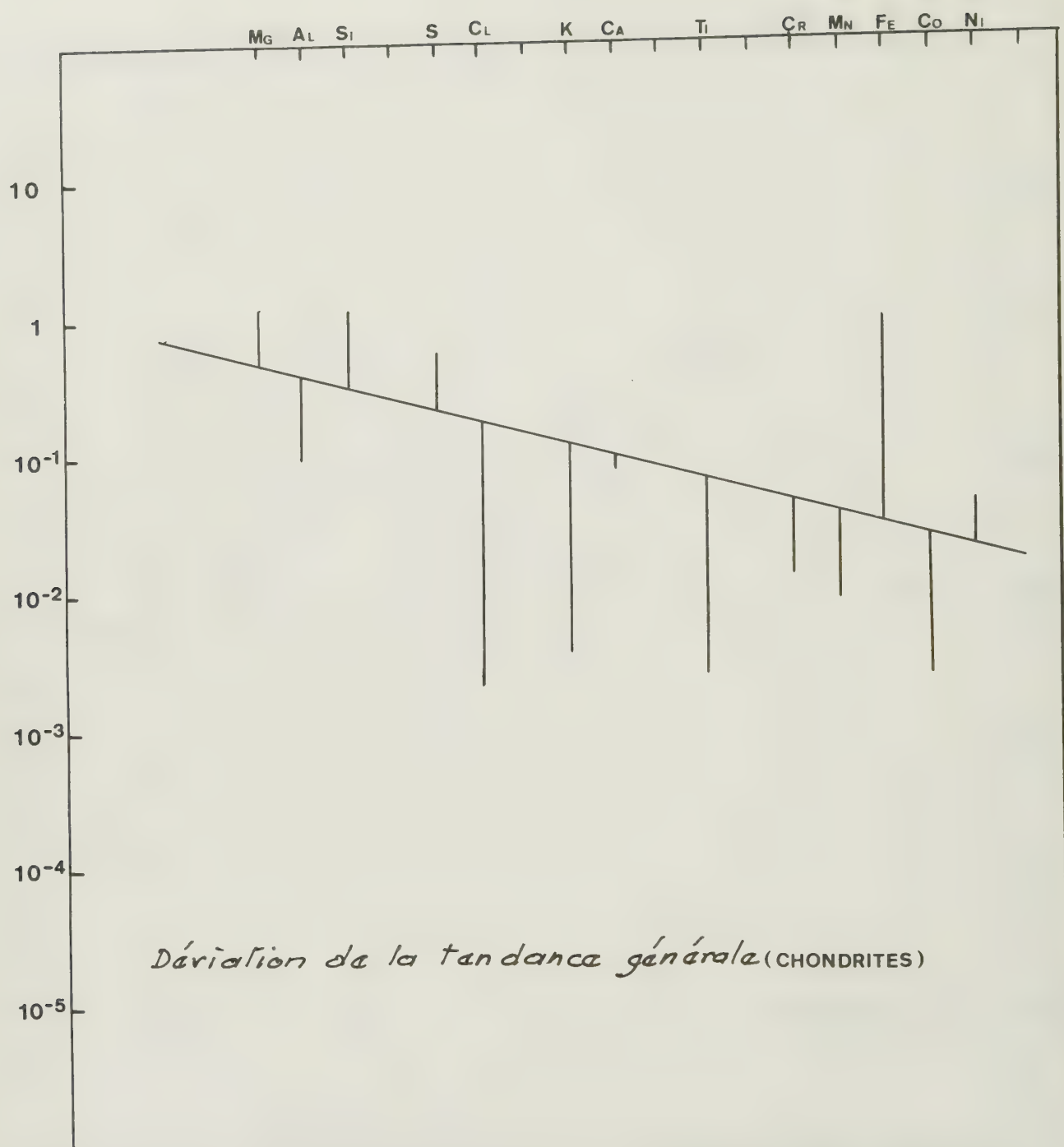


Figure 39 - Schéma montrant la méthode utilisée pour la sommation des diatances de la déviatiön par rapport à la tandance générale (un exemple pour les chondrites).

Tableau 23

Comparaison des rapports des abondances des éléments entre les sphérules et des mélanges pondérés de différentes manières entre les chondrites carbonées, les roches lunaires et la croûte terrestre.

Elément	Sphérules A	Composition de :			
		Chondrites x 0,2 Roches lunaires x 0,6 Croûte terrestre x 0,2		Chondrites x 0,2 Roches lunaires x 0,8	
		Abondance B	Rapport A/B	Abondance C	Rapport A/C
Mg	0,12	0,38	0,32	0,41	0,29
Al	0,33	0,24	1,4	0,23	1,4
Si	1	1	1	1	1
S	0,12	0,11	1,1	0,11	1,1
Cl	0,06	0,001	6	0,001	6
K	0,021	0,017	1,2	0,005	4,2
Ca	0,28	0,19	1,5	0,22	1,3
Ti	0,13	0,10	1,3	0,13	1
Cr	0,039	0,003	13	0,003	13
Mn	0,014	0,005	2,8	0,006	2,3
Fe	1,4	0,41	3,4	0,46	3,0
Co	0,011	0,0005	22	0,0005	22
Ni	0,010	0,010	1	0,010	1

Tableau 24

Somme des écarts et des écarts quadratiques des abondances des éléments par rapport à une tendance générale définie par la méthode des moindres carrés,

	Somme des distances de déviation	
	$\sum (\Delta x)$	$\sum \Delta x^2$
	en unités arbitraires	
Sphérules	70,6	626
Chondrites	104,8	1 154
Croûte terrestre	114,6	1 384
Roches cristallines lunaires	118,2	1 609

D'autre part, les abondances solaires ont été révisées beaucoup de fois et, là encore, il y a un certain danger à considérer le modèle solaire comme le modèle le plus élémentaire que nous connaissions.

A la suite des remarques que nous venons de faire, en ce qui concerne notamment les écarts quadratiques des quatre catégories de corps étudiés, deux possibilités se présentent :

1° - Ou bien les chondrites carbonées continuent à demeurer la matière la plus primitive que nous connaissions dans le système solaire et, dans ce cas, les sphérules ont subi en moyenne une ségrégation, mais dans un sens opposé à celui de la ségrégation de la croûte terrestre et des roches cristallines lunaires.

2° - Ou bien les chondrites ne représentent pas la matière la plus primitive du système solaire, et seraient, elles aussi ségrégées. Dans ce cas les sphérules si elles sont d'origine cosmique, bien que ne représentant pas la totalité de la poussière cosmique collectable, sont les représentants possibles de la matière la plus primitive du système solaire en particulier.

3° - Les graphiques d'abondance des éléments présents dans les sphérules montrent cependant que nous sommes en présence d'une classe spéciale, primordiale ou non, mais différente des matériaux terrestres et des roches lunaires. Dans l'état présent de nos connaissances sur les ségrégations terrestres, aucune n'a produit ce type de matériaux, on ne peut donc que supposer une origine cosmique aux sphérules apparentées au chondrite ou non.

b) - Modèle météoritique

En proposant aux modèles d'origine extra-terrestres un modèle météoritique et un modèle solaire nous avons voulu préciser et diversifier les possibilités d'une appartenance cosmique.

Le modèle cosmique habituellement proposé (SUESS-UREY, A.G.W. CAMERON (1968)) est une tentative de choisir parmi les météorites celles dont la composition est la plus proche du Soleil et de compléter pour certains éléments, notamment les gaz, par les abondances solaires.

Bien qu'il soit indéniable que les météorites carbonées semblent être la classe météoritique la plus primitive, nous n'avons pas pris ce modèle pour examiner les abondances du nickel et du cobalt que l'on trouve dans les océans [Pour les chondrites carbonées sensu stricto : nickel 12 000 ppm, cobalt 690 ppm d'après B. MASON (1962-1963)]. Il nous a semblé plus logique de faire appel à un modèle de météorites de pierres purement et simplement.

En effet, ou bien nous supposons que la matière cosmique nous arrive dans un état aussi diffus que possible et à ce moment-là il faut considérer soit un modèle solaire soit un modèle cométaires ou bien on suppose que cette matière nous arrive dans un état fragmenté et le choix des météorites devrait être un choix de fréquence plutôt que toute autre caractéristique. Ainsi pour le "modèle météoritique" nous prenons les abondances en nickel et cobalt dans les météorites de pierre ce qui amène à un chiffre légèrement inférieur à celui des chondrites carbonées, qui, elles, sont beaucoup plus rares. D'après les compilations faites par KRINOV (1960) (p. 284) les valeurs sont alors 11 000 ppm pour le nickel et 800 ppm pour le cobalt.

Nous remarquons que la valeur proposée par KRINOV est supérieure à celle plus

moderne proposée par B. MASON pour les chondrites carbonées alors que ce devrait être l'inverse. Pour le cobalt il est donc préférable d'utiliser des statistiques issues d'analyse plus moderne notamment par l'activation, ainsi le chiffre proposé par H.J.M. BOWEN et D. GIBBONS (1963) de 500 ppm semble beaucoup plus sûr.

c) - Modèle solaire

L'intérêt du modèle solaire est double - même si nous ne connaissons aucun processus pour supposer valablement que les gaz chauds issus du Soleil puissent se condenser dans un espace relativement peu éloigné du Soleil et donner des particules qui pourraient se retrouver alors dans le Nuage Zodiacal ; cette supposition doit être considérée à titre de comparaison chimique entre le Soleil et la matière extra-terrestre qui peut se trouver sur la Terre.

A l'autre bout des possibilités, et celle-ci jusqu'à nouvel ordre plus vraisemblable, les restes de la Nébuleuse qui a donné naissance au Soleil peuvent de la même manière tomber progressivement vers le Soleil et se retrouver dans celui-ci. Nous verrons qu'il est possible que ces deux cas donnent des abondances d'éléments différents, mais il n'en reste pas moins vrai que dans la première hypothèse, là encore, il faut supposer une identité de composition entre le Soleil et la matière qui tombe sur le Soleil.

Pour les comparaisons de pourcentage, le calcul des abondances doit être conduit sur une base qui exclut les éléments gazeux. Y. YOKOYAMA (1969 - Communication privée) a calculé cette teneur comme étant 1,5 % et 0,09 % pour le nickel et cobalt sur la base des données de E. MULLER.

III - CALCUL DE LA MASSE DE POUSSIÈRE COSMIQUE ACCRÉTÉE À LA TERRE

Pour effectuer cette estimation, nous utiliserons les résultats d'analyses de la carotte V 12 que nous avons déjà utilisée pour les statistiques de sphérules et dont nous avons mesuré la vitesse de sédimentation a été analysée par fluorescence X pour les principaux éléments par GUILLERMAUX et par spectrométrie optique par E. RAPERT pour les éléments à l'état de traces.

Cette carotte a été prélevée dans une région de plaine abyssale, à l'ouest de l'Australie, dans une région à faible taux de sédimentation et loin de toute activité volcanique.

a) - Nickel

La teneur moyenne en nickel pour cette carotte est 224 ppm (moyenne sur 15 échantillons. H. PETERSON et H. ROTSCHI (1950) ont trouvé, dans les boues rouges de 0,041 à 0,089 % d'oxyde de nickel. Par ailleurs, F. BONNER et ALZIRA SOARES LAURENCO utilisant l'analyse par activation (1965) trouvent une valeur moyenne de 270 ppm pour deux carottes et pour 39 échantillons. Ces valeurs sont très voisines de celles que nous avons obtenues. Comme nous savons que, dans la croûte terrestre, on trouve 80 ppm de nickel, nous faisons l'hypothèse que le surplus de nickel est d'origine cosmique.

Si nous désignons par M , m_t et m_c respectivement la masse totale de sédiment, la fraction d'origine terrestre du sédiment et la fraction d'origine cosmique et par N le nombre de ppm de nickel du modèle choisi : Soleil, chondrite ou sphérules, on a la relation :

$$\frac{244}{10^6} M = \frac{80}{10^6} m_t + \frac{N}{10^6} m_c$$

Comme aux erreurs d'expérience près M est très voisin de m_t , nous pouvons écrire :

$$m_c = M \frac{164}{N}$$

Nous avons vu que pour cette carotte, le taux de sédimentation était 1,5 mm pour 1 000 ans, ce qui correspond à un poids de sédiment par centimètre carré de

$$M = 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2\text{-an.}$$

Dans le cas d'un modèle solaire, le surplus de nickel correspondrait donc à :

$$N = 15\,000 \text{ ppm}$$

$$\frac{244}{10^6} M = \frac{80}{10^6} m_t + \frac{15\,000}{10^6} m_c$$

$$\frac{M}{10^6} (164) = \frac{15\,000}{10^6} m_c$$

$$m_c = \frac{3,05 \times 1,64 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^4}$$

$$m_c = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

$$\text{soit : } 1,6 \cdot 10^7 \text{ tonnes/Terre-an}$$

Dans le cas d'un modèle chondritique :

$$N = 11\,000$$

$$m_c = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

$$\text{soit : } 2,4 \cdot 10^7 \text{ tonnes/Terre-an}$$

et dans le cas du modèle des sphérules :

$$N = 0,3 \% = 3\,000 \text{ ppm}$$

$$m_c = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

$$\text{soit : } 8,2 \cdot 10^7 \text{ tonnes/Terre-an.}$$

b) - Cobalt

La teneur moyenne des 15 échantillons de la carotte V 12 en cobalt est 135 ppm. Cette valeur est très proche des valeurs moyennes trouvées dans les boues rouges des sédiments du Pacifique. Dans les roches terrestres, la teneur moyenne en cobalt est 23 ppm. Le surplus est donc de 112 ppm.

Si ce surplus de cobalt est attribué à un apport extra-terrestre, il correspondrait, dans le cas d'un modèle solaire avec 900 ppm

$$3,7 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

$$\text{soit : } 1,8 \cdot 10^8 \text{ tonnes/Terre-an}$$

dans le cas du modèle chondritique avec 500 ppm

$$6,7 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

soit $3,3.10^8$ tonnes/Terre-an.

Dans le cas du modèle des sphérules, les évaluations de la teneur en cobalt dans les sphérules se situent entre 0,19 % et 0,7 % en prenant un chiffre de 2 000 ppm, c'est-à-dire pratiquement la limite inférieure, on trouve :

$$1,6.10^{-5} \text{ g/cm}^2\text{-an}$$

soit : $8,2.10^7$ tonnes/Terre-an

la limite supérieure donnant un résultat 3,7 fois plus faible.

IV - CRITIQUE DE LA METHODE

Le tableau 25 résume les différents résultats que nous avons obtenus par cette méthode.

Tableau 25

Elément utilisé	Modèle solaire	Modèle chondrite	Modèle sphérules
Nickel	$1,6.10^7$ t/Terre-an	$2,4.10^7$ t/Terre-an	8.10^7 t/Terre-an
Cobalt	$1,8.10^8$	$3,3.10^8$	$8,2.10^7$

Il faut remarquer tout d'abord que, quelle que puisse être l'imprécision statistique du modèle des sphérules :

1° - Les évaluations obtenues à partir des différents modèles sont assez voisines.

2° - Seul le modèle sphérules fournit deux chiffres à peu près identiques que l'on emploie le nickel ou le cobalt ($8,1 \pm 0,1.10^7$ tonnes/Terre-an). Les marges d'erreurs introduites par la marge des variations de composition des sphérules étant bien inférieures au rapport dix que l'on obtient en employant les autres modèles de composition chimique.

F. BONNER (1965) arrive à un résultat sensiblement identique en estimant le surplus de nickel extra-terrestre à 4.10^{11} grammes/Terre-an, ce qui, en utilisant le modèle chondritique donne 4.10^7 tonnes/Terre-an, et avec le modèle sphérules $1,2.10^8$ tonnes/Terre-an.

D.H. WISEMAN (1964) arrive également à des résultats assez voisins avec une teneur en nickel pour la matière météoritique suggérée par B. MASON de 1,6 %, ceci donne $3,6.10^6$ tonnes/Terre-an, ce qui, avec le modèle sphérules que nous proposons donnerait $1,9.10^7$ tonnes/Terre-an.

ZAHAROV et al. (1962) dosant le nickel dans les retombées atmosphériques arrive à un chiffre dix fois supérieur, mais il faut tenir compte que, dans ces évaluations, les collections étaient faites à une latitude où les retombées fines, notamment les débris de bombes atomiques, accusent un fort maximum.

Cependant, s'il y a un assez bon accord entre les expérimentateurs qui ont utilisé le cobalt ou le nickel pour évaluer l'importance des retombées cosmiques, l'accord est beaucoup moins bon lorsqu'on utilise d'autres éléments également rares à la surface de la Terre.

Ainsi J. BAKER et J.E. ANDERS (1968) ne trouvent que 6.10^4 tonnes/Terre-an en utilisant l'irridium et l'osmium et le modèle chondritique.

La critique de la méthode doit donc poser, avant tout, le problème d'une possibilité d'enrichissement terrestre en nickel et en cobalt des fonds océaniques.

S'il s'agissait d'éléments hydrothermaux ou d'éléments ayant de fortes possibilités de migration en phase aqueuse comme le manganèse, on pourrait imaginer que la forte teneur en cobalt et nickel des sédiments océaniques provient d'une extraction à partir des couches profondes, mais aucune raison physico-chimique ne semble indiquer une telle possibilité.

Il est également difficile d'imaginer une érosion préférentielle du nickel et du cobalt à la surface de la Terre suivie d'un dépôt privilégié dans les fonds océaniques alors que les autres éléments se seraient redéposés sur les terres émergées. D'autres auteurs ont recherché une origine dans le volcanisme : les remontées de roches profondes doivent évidemment augmenter les teneurs en nickel et cobalt des fonds océaniques puisque ces roches sont plus riches en ces éléments que les granites et les roches sédimentaires, cependant, il n'est pas possible qu'elles augmentent ces teneurs au-delà de leurs teneurs propres, il est donc nécessaire là encore de faire appel à une autre source.

Certains océanographes ont proposé d'expliquer une teneur anormalement élevée en un élément par une teneur anormalement élevée en un autre élément. C'est ainsi que K.K. TUREKIAN a proposé que le surplus de cobalt soit attribué au Mid Atlantic Ridge ou à des apports continentaux de la même manière que les surplus de barium ou d'argent (1968).

Cependant, aucune de ces hypothèses ne résiste lorsqu'on examine les bilans globaux. En effet, si l'on veut expliquer un excès de nickel ou de cobalt par une source terrestre, il faut non seulement trouver cette source, mais encore montrer où pourraient aller les autres éléments provenant de cette source, et mis en suspension, en mouvement du fait de l'érosion de cette source.

La sédimentation océanique dépose dans les régions centrales des océans quelques 10^9 tonnes de matière. Si on suppose que cette matière est entièrement d'origine terrestre et que dans ces dépôts certains éléments sont dix fois ou même cent fois plus concentrés que dans la croûte terrestre, ils ne pourraient provenir que de 10^{10} ou 10^{11} tonnes de croûte terrestre, il faudrait donc trouver ce que devient l'apport supplémentaire des autres éléments. On aboutit donc à une impasse si l'on refuse d'admettre une origine cosmique pour certains éléments car on est alors obligé de faire disparaître des masses importantes de matière pauvre en nickel.

Une autre hypothèse a été proposée par TUREKIAN (1968) cette hypothèse tient compte du fait que les sédiments côtiers sont pauvres en nickel et en cobalt et qu'ils pourraient représenter précisément ces masses importantes de croûte terrestre remise en suspension et fournissant ainsi les fortes quantités de cobalt et nickel qui se déposeraient alors dans les régions centrales océaniques. TUREKIAN considère alors l'ensemble des sédiments marins avec leurs teneurs respectives en cobalt et établit une teneur moyenne égale à 22 ppm, ce qui est très proche de la valeur que l'on accorde généralement à la croûte terrestre moyenne, ce qui reviendrait à dire que les masses de sédiment atteignant 10^{11} tonnes se déposent effectivement dans les régions côtières, et appauvries en nickel et cobalt, elles les fournissent aux régions centrales. Cependant, ces quantités de sédiment introduites

dans la mer apparaissent en contradiction avec la masse de sédiment charriée par les fleuves et les apports éoliens qui ensemble ne fournissent que quelques milliards de tonnes.

Il est certain que, si ces estimations sont confirmées, aucune conclusion ne peut être tirée quant à l'origine cosmique d'une partie de ces éléments dans les sédiments océaniques profonds.

M.K. HORN et J.A.S. ADAMS (1966) ont cherché à reconstituer le teneur moyenne des roches ignées à partir des teneurs des sédiments, là encore, ils arrivent à une composition très voisine de celle obtenue directement par analyse chimique des roches elles-mêmes. Dans le cas du cobalt, par exemple, la teneur est 23 ppm, c'est-à-dire exactement la même que celle que donne MASSON (1962). K.K. TUREKIAN critique ce travail estime que les teneurs des roches sédimentaires choisies par HORN et ADAMS ne sont pas toujours représentatives, cependant, la même critique s'applique à ses propres évaluations.

Dans ces hypothèses, certaines estimations comme celle du poids total de sédiments déposés dans les régions centrales océaniques qui sont les régions riches en nickel et en cobalt sont relativement sûres, alors que l'estimation des matériaux déposés plus près des côtes le sont beaucoup moins; essentiellement en raison des variations de vitesses de sédimentation. Par conséquent, ces estimations sont assez fragiles mais elles n'excluent pas la possibilité d'une origine purement terrestre des surplus océaniques de nickel et cobalt.

Il faut donc, pour trancher entre ces diverses hypothèses, savoir si une sédimentation extrêmement intense est possible dans les régions où les sédiments sont très pauvres en cobalt et en nickel, car, d'après les évaluations faites à partir du nickel il faudrait un volume total de sédiments pauvres égal à 6.10^{10} tonnes, et égal à $1,2.10^{11}$ tonnes pour les évaluations à partir du cobalt.

Les évaluations les plus récentes sur la quantité de matière déposée dans l'ensemble des mers et océans faites par MAC KENZIE et GARRELS donnent 8.10^9 tonnes de matière en suspension auxquelles il faut ajouter 3.10^9 tonnes par an de matière solubilisée. Par ailleurs, nous savons qu'une partie non négligeable de ces apports est remise en suspension dans l'air à partir de l'océan. Ces quantités sont supposées sédimenter au voisinage des côtes, les régions centrales étant alimentées surtout par des apports éoliens. Dans ce schéma purement terrestre, ces quantités devraient donc perdre leur nickel et leur cobalt qui iraient sédimenter dans les régions centrales océaniques.

D'autre part, physiquement ce processus semble difficilement imaginable étant donné la rapidité avec laquelle les éléments trace sont généralement fixés par la flore et la faune marine, donc fixés sur place géographiquement parlant et d'autre part il faut noter que les masses ainsi obtenues sont en défaut d'un facteur 10 avec ce qui serait nécessaire si l'on prend le cobalt et d'un facteur 4,9 si on utilise le nickel.

HORN et ADAMS ont cherché à déterminer la masse totale érodée déposée par une autre méthode. Partant des teneurs en divers éléments du sédiment, ils reconstituent la roche érodée d'origine et arrivent ainsi à la valeur de 2.10^{18} tonnes, étant donnée l'échelle des temps géologiques, cela donnerait une valeur de $0,5.10^9$ tonnes par an en moyenne. Etant donné que nous n'avons aucune raison d'estimer, sur des bases géologiques, que nous sommes dans une phase d'érosion particulièrement active,

par exemple 10 fois plus active, nous avons donc, à travers les évaluations de HORN et ADAMS, une nouvelle raison de penser que le surplus de nickel et de cobalt des régions centrales océaniques doit être attribué à des arrivées cosmiques, d'autant plus que, comme nous l'avons vu, cette hypothèse donne des résultats cohérents avec le modèle "sphérules".

L'hypothèse d'arrivée de poussière cosmique, si on lui attribue uniquement une composition chondritique, pose aussi certains problèmes car on obtient alors des valeurs très différentes si l'on utilise le cobalt et le nickel ou l'iridium et l'osmium.

L'analyse des sphérules amène à penser que, à l'origine, au moment même de la formation du système solaire, certains processus de ségrégation ont eu lieu.

L'existence de cette première ségrégation, qui a dû prendre place dans la nébuleuse initiale, est peut-être également responsable des différences de densité des planètes du système solaire, puisque, même pour les planètes internes, ces différences de densité moyenne ne peuvent pas s'expliquer par des compressions plus ou moins grandes liées à leur masse et que la présence ou l'absence d'hydrogène ne peut être invoquée.

En conclusion, la méthode d'appréciation de la masse cosmique accrétée par la Terre à partir du surplus de certains éléments dans les fonds océaniques semble très cohérente, surtout si l'on admet la possibilité d'un autre modèle que le modèle chondritique.

ORIGINE POSSIBLE ET IMPOSSIBLE POUR LES SPHERULES
VALEUR DE L'HYPOTHESE COSMIQUE

Morphologie - composition gisements :	Caractéristiques Observées	O R I G I N E S					
		Terrestres			Extra-terrestres		
		Artificielle	Erosion éolienne	Eruption volcanique	Ablation de météorite	Météore comète	Poussière zodiacale
	Présence dans les sédiments marins et roches anciennes	non					
	Présence permanente dans les neiges polaires	non		non			
	Variation périodique dans les neiges polaires		non	non			
	Pas de présence préférentielle dans les dépôts de cendre volcanique			non			
	Forme parfaitement sphérique		non				
	Composition et association d'élément ne concordant pas avec les minéraux terrestres ni avec les laves		non	non			
	Pourcentage d'éléments spécifiques par rapport au fer et au silicium	non	non	non	non		
	Origines	Impossible			très peu probable*	Possible	

* Il faut en effet invoquer une ségrégation au moment de l'ablation.

Chapitre 9

EVALUATIONS POSSIBLES DES MASSES ACCRETEES PAR LA TERRE PAR LE FLUX DETECTE DANS L'ESPACE, LA RADIOACTIVITE OU LES QUANTITES D'ENERGIE APPORTEES A LA TERRE

Avant d'examiner l'ensemble des résultats obtenus et de confronter toutes les méthodes, il est bon de rappeler quels sont les derniers résultats obtenus avec diverses méthodes que nous n'avons nous-mêmes qu'abordées : les collections dans l'espace, la mesure de radionuclides formés dans la poussière cosmique par le rayonnement cosmique de grande énergie, les méthodes qui peuvent être fondées sur l'énergie d'apport ou encore les informations qui sont en train d'être recueillies sur la constitution du sol lunaire ainsi que sur la constitution de Mars peuvent apporter également des éléments importants pour résoudre le problème qui nous occupe.

I - ESTIMATIONS DIRECTES DU FLUX DE POUSSIÈRES DANS L'ESPACE

Les déterminations du flux de poussière cosmique dans l'espace peuvent être classées en trois groupes : les résultats obtenus avec des dispositifs de perforation, de coupure ou de cratères, les résultats obtenus avec des dispositifs fondés sur les quantités de mouvement sans que pour cela une rupture soit nécessaire, et les résultats de collections de poussière soit en fusées, soit en satellites, soit éventuellement en ballons atmosphériques.

Pendant longtemps, les deux premiers groupes ont donné des résultats relativement différents, les microphones ou les photomultiplicateurs indiquant des flux de l'ordre de $3,6 \cdot 10^6$ tonnes/Terre an alors que les dispositifs fondés sur la perforation indiquaient des valeurs moindres de 1 ou 2 ordres de magnitude.

Pendant les trois dernières années, une série de réétalonnages a été effectuée pour les différents dispositifs utilisés. Le réétalonnage des microphones avec des particules de grande énergie a montré que le premier étalonnage était sous-évalué d'un facteur 30 environ et a de plus montré que l'intensité des impacts dépendait de la densité et de la structure des particules incidentes.

L'accumulation de statistiques, le réétalonnage du dispositif de perforation ont montré par ailleurs que les précédentes évaluations étaient au contraire sous-évaluées, ce qui fait qu'à l'heure actuelle l'accord entre les différents modes de mesure est considérablement moins grand. En fait, même si l'écart subsistait, il y aurait des raisons physiques qu'il en soit ainsi, en effet, il est très possible que la condensation de vapeur solide dans le vide ou le semi-vide produise des particules du type de whiskers, et dans ces conditions à impact égal, leur pouvoir de perforation ou d'excavation de cratères dans les surfaces polies est infiniment

plus faible. DE SITTE et al. (1967) ont montré notamment qu'à énergie égale, le pouvoir de pénétration dépendait de la densité.

Mais si l'accord obtenu avec ces deux méthodes semble meilleur, le désaccord avec les collections faites en fusées reste très grand. Ce désaccord s'accroît encore lorsqu'on s'éloigne de la Terre. En effet, les sondes envoyées loin de la Terre, vers Mars ou Vénus, ont montré des flux plus faibles que les flux enregistrés par les satellites de la Terre. Ainsi tout se passe comme si, lorsqu'on s'éloigne de la Terre, fusées, satellites, sondes lointaines, les flux diminuaient progressivement. L'appareillage employé sur les sondes lointaines est le même que celui utilisé sur les satellites, malheureusement les raccords n'ont pas été faits avec les mêmes appareils, les sondes lointaines étant encore accélérées dans les zones où travaillent les satellites.

On a suggéré que ces différences étaient dues à des bruits parasites, mais vérification faite, il semble bien que l'on soit en présence d'un fait physique réel.

Dans la mesure même où un désaccord subsiste entre ces techniques spatiales pourtant voisines, il semble que l'ensemble des expérimentateurs ne va pas chercher à dégager, à l'heure actuelle, un chiffre unique, mais plutôt chercher à dégager trois valeurs de flux qui peuvent exister dans l'espace :

1° - un flux circum solaire, en dehors de l'Espace Terre-Lune, ce flux pourrait représenter quelques $10^3 \pm 1$ tonnes par an.

2° - La flux dans l'espace Terre-Lune mesuré par les satellites se situe entre $10^6 - 10^4$ tonnes/Terre-an. L'explication de ce flux plus important que le précédent doit peut-être, être recherchée dans un effet "Lune".

En effet quand des particules fines produites sur la Terre sont accélérées avec des accélérateurs électrostatiques à des vitesses de quelques kilomètres/seconde viennent frapper des surfaces, les cratères obtenus ne contiennent pas toujours la particule incidente et une masse de matière plus importante que la particule incidente est arrachée à la cible (DE SITTE).

De la même manière les verres polis exposés lors des vols Gemini ont montré des cratères dans ces surfaces. L'énergie libérée lors de l'impact de la particule incidente a des vitesses que nous pouvons supposer identiques à celles du météore ou radio-météore soit par exemple 30 km/s., est suffisante pour communiquer à une partie de la substance pulvérisée une vitesse supérieure à 2 km/s, c'est-à-dire autorise ces particules à échapper à l'attraction de la Lune.

BOWEN et son équipe ont ainsi cherché des relations entre les pluies provoquées par les micro-météores et les phases et positions de la Lune. Ce problème n'est pas résolu.

En résumé il n'est pas absurde de penser que le flux observé dans l'espace soumis à l'attraction de la Terre, la densité de poussière soit plus grande que dans l'espace interplanétaire.

3° - Un flux de très petites particules, détecté lors des collections en fusées ou par les expériences sur les nuages noctiluscents. Certains expérimentateurs ont émis l'hypothèse que ces très grandes quantités de poussières très fines pouvaient provenir de l'ablation de plus grosses poussières. Cependant, une série d'expériences publiée récemment par CLARK (1970) sur la diffusion de la lumière par les poussières dans les hautes couches de l'atmosphère suggère au contraire une corrélation

entre la quantité de ces poussières et l'activité solaire.

S.A. LINDBLAD (1968) en analysant les variations de longue durée des flux de météores a également proposé une explication reliée à l'activité solaire qui s'exercerait par des augmentations ou contractions de la haute atmosphère. Ainsi selon l'état de la très haute atmosphère le freinage serait plus ou moins rapide et produirait plus ou moins d'ablation.

En fait, quelles que puissent être les explications, actuellement l'ensemble des expériences spatiales ne peut fixer de limites précises au flux de poussière cosmique si l'on considère l'ensemble des dimensions de poussières que l'on rencontre dans l'espace.

II - LA RADIOACTIVITE D'ORIGINE COSMIQUE

La poussière cosmique est soumise, au cours de son existence, à l'action du rayonnement cosmique. Celui-ci provoque dans les poussières un certain nombre de réactions nucléaires, la quantité de produits ainsi engendrés sera proportionnelle au temps d'exposition de la poussière au rayonnement cosmique.

Par ailleurs, le nombre de réactions engendrées dépendra de la région de l'espace où se trouve la poussière cosmique puisque le flux total du rayonnement cosmique se compose du rayonnement galactique et du rayonnement solaire qui n'ont pas la même intensité au voisinage du Soleil, dans les zones moyennes du système solaire et à la périphérie du système solaire.

L'appréciation de la masse accrétée par la Terre par la détection des noyaux radioactifs dans ces poussières ne peut donc, dans les meilleurs cas, que nous indiquer le produit : masse x temps d'exposition x flux (dépendant des régions de l'espace intéressées).

Cette détermination est donc sujette à l'ensemble des indéterminations que l'on a sur l'évaluation de ces facteurs, et des hypothèses que l'on est obligé de faire.

Les régions de l'espace où séjourne la poussière considérée impliquent des possibilités de temps d'exposition très différentes, dans les confins du système solaire, une poussière même à l'état dispersé, subit peu de forces pouvant modifier son orbite et par conséquent son temps de vie pourrait être très long. Cependant, la facilité d'agglomération en masses plus grandes ne doit pas être négligée et les formes de matière provenant de ces régions nous apparaissent généralement à l'état de comètes. La masse de ces comètes est suffisante pour qu'elles se fassent elles-mêmes ombre vis-à-vis du rayonnement cosmique. Quand les comètes pénètrent dans l'espace interplanétaire, leur temps de vie semble relativement court et leur désagrégation en poussière isolée, en averse de météores, est bien connue. Sous cet aspect, l'irradiation par le rayonnement cosmique doit être maximale, l'irradiation se faisant par les rayons cosmiques solaires et par les rayons cosmiques galactiques. Malheureusement, dans ces régions, le rayonnement lumineux du Soleil et le vent solaire agissent sur les particules de poussière. Rien que sous l'effet de la poussée de radiation, les plus fines poussières sont expulsées du système solaire, celles dont les dimensions se situent vers quelques microns et quelques dizaines de microns subissent un ralentissement dû à l'effet POYNTING-ROBERTSON, et donc, à l'inverse des précédentes, tombent vers le Soleil.

Le temps d'exposition ne peut donc être déterminé qu'à l'aide d'hypothèses relativement arbitraires.

Il en est de même du flux responsable de l'irradiation, la région de l'espace où se trouve la poussière étant inconnue et la valeur absolue du flux est considérée comme insuffisamment sûre.

La méthode la plus sûre reste alors la comparaison de deux types d'activité comme par exemple celle du béryllium-10 et de l'aluminium-26. Le premier peut être formé dans l'espace, mais il doit surtout être formé à partir de l'azote dans l'atmosphère, l'aluminium-26, lui, ne peut être formé dans l'atmosphère qu'à partir de l'argon. La comparaison des activités trouvées dans les sédiments, compte tenu des valeurs des sections efficaces ne permet pas de conclure si le surplus d'aluminium-26 observé dans les sédiments marins autorise des quantités aussi importantes que plus de 10^8 tonnes/Terre-an. Nous avons montré dans un précédent travail que même la connaissance des sections efficaces responsables de la formation de ces éléments était actuellement totalement insuffisante.

La méthode fondée sur la détection des radionuclides formés par le rayonnement cosmique ne fournit donc, pas plus que les méthodes spatiales, de limites sûres.

III - ENERGIE D'APPORT

Quels que soient la taille, l'aspect et la composition de la matière accrétée par la Terre, cette matière rencontre la Terre avec une vitesse maximale de 80 km/s et une vitesse minimale de 11 km/s. Au-delà de 80 km/s, les météores ne devraient plus appartenir au système solaire, seul OPICK (1958) a cru voir des météores ayant une vitesse supérieure, mais ses observations n'ont jamais été confirmées. D'autre part, la limite de 11 km/s est celle pour laquelle la différence de vitesse avec la Terre est minimale et pour laquelle donc l'énergie de rencontre n'est due qu'à l'attraction de la Terre.

Etant donné que ces vitesses interviennent au carré, entre 80 km/s et 11 km/s nous aurons un facteur 53.

Pour une masse totale de 10^9 tonnes/an et pour une vitesse de 11 km/s on aura:

$$6.10^{26} \text{ ergs/Terre-an}$$

Pour la même masse et une vitesse de 80 km/s

$$3,2.10^{28} \text{ ergs/Terre-an.}$$

Ceci représente respectivement des puissances de $1,9.10^{19}$ ergs/s et 1.10^{21} ergs/s.

Si cette énergie est répartie uniformément sur le globe, hypothèse valable pour le cas où la vitesse n'est due qu'à l'attraction terrestre, le flux reçu est donc $3,8.10^4$ ergs/m² s, soit $3,8.10^{-3}$ watts/m² s.

Pour une vitesse de 80 km/s, par contre, il est plus logique de supposer un flux unidirectionnel et le facteur 53 doit être multiplié par un facteur de surface ce qui donne :

$$6,8.10^6 \text{ ergs/m}^2 \text{ s}$$

$$\text{soit} \quad 6,8.10^{-1} \text{ watts/m}^2 \text{ s.}$$

Ces puissances ne sont pas négligeables, en fait, une puissance du même ordre

(10^{18} à 10^{20} ergs) est nécessaire pour rendre compte du phénomène d'ionisation polaire et des aurores boréales. Ces apports d'énergie sont cependant dans une gamme d'énergie différente et sont attribués aux électrons du vent solaire.

Des énergies du même ordre sont nécessaires pour permettre la création d'une couche ionisée sporadique dans les régions E et D, et, en fait, des arrivées de poussières météoriques sont peut être à l'origine de la formation de ces couches.

Nous avons cherché à mettre en évidence ces effets. Le Centre Micro-ondes de Florence, sous la direction du Professeur CARRARA, a organisé une surveillance d'une liaison en ondes très longues dont la réflexion et la phase dépendent des conditions d'ionisation dans les couches où peut précisément se faire le freinage de la poussière cosmique. Un effet a pu être mis en évidence lors de l'arrivée des Léonides (Carrara, Grjebine, 1966, 1968).

GERARD (1966) a signalé des effets de même nature pendant les mois qui correspondent aux maximums des arrivées des météores sporadiques mais, dans aucun cas une évaluation de quantité de poussière n'a pu être faite par ces méthodes.

On peut simplement conclure qu'il est possible que dans un proche avenir on puisse évaluer la quantité de poussière cosmique par ses effets d'apport d'énergie. L'évaluation des apports d'énergie détectables dans les régions polaires, aurores boréales, ionisation, impliquent des arrivées de matière non gazeuse de l'ordre du million de tonnes rien que dans la gamme des vitesses de 400 km/s.

IV - LES EFFETS LUMINEUX DANS LA HAUTE ATMOSPHERE

Les effets optique dans la couche supérieure de l'atmosphère (80 à 100 kilomètres) confirment cette hypothèse, en effet, F. LINK (1964), FIOCCO (1965) et CLARK (1970) ont observé les effets dus à la poussière en utilisant trois méthodes différentes, en interprétant leurs observations en terme de masse, ils donnent une estimation allant de quelques 10^6 à quelques 10^7 tonnes/Terre an.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

I - CLASSIFICATION DES RESULTATS

Nous avons utilisé dans cette étude sept méthodes pour déterminer la masse qui pouvait être accrétée par la Terre, ces méthodes présentaient quelques vingt deux variantes suivant les différentes normalisations des échantillons ou les différents modèles géochimiques que l'on pouvait choisir.

Afin de pouvoir comparer les différents résultats obtenus, il faut en premier lieu tenir compte de la taille sous laquelle se présente la matière qui a servi à la détermination. Pour cela, nous avons porté sur la figure 44 les tailles des objets mesurés en fonction des quantités trouvées. En examinant ce graphique, on voit que l'on a une décroissance régulière des estimations au fur et à mesure que la taille des particules utilisées est plus grande et plus différenciée. C'est ainsi que le point obtenu à partir des sphérules se trouve aux environs de $8,5 \cdot 10^5$ tonnes, le point moyen obtenu par les méthodes de filtration se trouve vers $2 \cdot 10^8$ tonnes et le point moyen obtenu par les méthodes ioniques ou d'évaporation globale se trouve environ deux fois plus élevé.

Il est évident que cette relation peut avoir une explication cosmique aussi bien qu'une explication terrestre.

Nous savons que la courbe de détermination des poussières cosmiques dans l'espace peut, si on la prolonge vers les petites dimensions, être compatible avec des quantités de l'ordre du milliard de tonnes et nous savons également que de la matière à l'état ionique peut être interceptée par la Terre, non pas par la section géométrique propre de la Terre, mais par la section de la magnétosphère, section environ 10 fois plus grande, cependant, plus la matière se présente sous de petites dimensions, moins nous avons de moyen de contrôler son origine cosmique.

Ainsi le graphique de la figure 44 doit normalement être complété par une estimation de fiabilité de chacune des méthodes, cette valeur doit être évaluée à partir de données autres que celles utilisées pour estimer la précision des mesures, car la précision d'une méthode peut être très grande alors que sa fiabilité reste très faible.

II - EXAMEN DE LA VALEUR DES METHODES UTILISEES

A - Les sphérules

Les évaluations de masses les plus faibles que l'on trouve sont celles obtenues par le dénombrement des sphérules. La masse que l'on trouve ainsi présente

deux types d'incertitude : la pollution au stade du laboratoire et la nature même des sphérules.

L'incertitude sur la nature des sphérules provient de ce qu'on pourrait les confondre avec des rejets actuels, cependant si l'on peut trouver des raisons plausibles pour attribuer une origine cosmique aux sphérules, la valeur de la méthode en sera augmentée.

Nous avons vu que nous avons des raisons géochimiques de penser que les sphérules sont cosmiques étant donné que les associations d'éléments que l'on y trouve ne correspondent pas aux règles de triage qui existent sur Terre, par ailleurs, leur existence dans des sédiments anciens par exemple permet d'écarter une origine industrielle, et leur existence, loin de centres d'activité volcanique permet d'écarter l'origine volcanique.

Les compositions chimiques que nous trouvons dans les sphérules les écartent des météorites.

L'ensemble des caractéristiques des sphérules sont regroupées dans le tableau 26 afin de les confronter avec les différentes origines possibles.

La valeur des sphérules en tant que matériel cosmique est donc très grande, cependant les estimations de masse varient beaucoup selon les milieux dans lesquels on étudie ces sphérules, et la difficulté de déterminer avec certitude les autres paramètres relatifs à ces milieux, introduit des doutes importants sur les chiffres trouvés.

Nous avons vu que la limite supérieure de l'estimation de la masse accrêtée était artificielle. Les mesures des sphérules dans les sédiments des lacs comportent en effet des facteurs insuffisamment déterminés. Le chiffre de $1,2 \cdot 10^5$ tonnes donné par les sphérules dans l'antarctique semblerait plus valable puisque le milieu est en principe exempt de corrosion ainsi que d'apports secondaires. La différence par rapport aux valeurs obtenues en utilisant les sphérules dans les carottes méditerranéennes, différence d'un facteur 4, peut s'expliquer de plusieurs façons : en premier lieu par la corrosion que subissent les sphérules dans le milieu marin. La différence avec les chiffres obtenus en utilisant les sédiments des lacs Léman et de Nantua peut avoir plusieurs origines car, comme nous l'avons vu, dans les lacs le problème se complique considérablement.

On peut donc adopter le chiffre de $1,2 \cdot 10^5$ tonnes comme un chiffre présentant le maximum de probabilité pour les particules de 7 microns. Ce chiffre est plus faible que celui obtenu par les mesures dans l'espace ou celui obtenu par les comptages des sphérules effectués par d'autres auteurs. En effet, la masse accrêtée, calculée d'après les comptages publiés par CROZIER est $3,6 \cdot 10^6$ tonnes/Terre-an, et la masse calculée d'après les comptages de Makoto SHIMA est $1,7 \cdot 10^7$ tonnes/Terre-an. Pour expliquer ce désaccord, outre les méthodes expérimentales qui peuvent être différentes, on peut invoquer l'action de facteurs purement atmosphériques, car on sait que pour les retombées radioactives de cette taille on a des différences importantes suivant la latitude du lieu de prélèvement.

Même si celles-ci une fois formées retombent vers le Soleil comme le laisserait penser la mesure de vitesse de la poussière zodiacale par rapport à la Terre (N.K. REAY - J. RING (1968)).

B - Les méthodes de filtration et d'évaporation

Si l'on abandonne la notion de forme différenciée, les sphérules, on quitte un ensemble qui était peut-être trop limité mais qui avait l'avantage de posséder un critère de cosmicité.

La quantité de retombée, évaluée par ces deux méthodes, se situerait deux ordres de grandeur au-dessus des évaluations faites à partir des sphérules.

Les prélèvements dans la stratosphère devraient présenter, en principe, un maximum de fiabilité, malheureusement, pour ces prélèvements, la statistique et la précision des résultats laissent à désirer.

En ce qui concerne les prélèvements au niveau du sol, nous avons vu que la complexité des phénomènes est telle que si l'on ne peut certainement pas affirmer que l'on est en présence de retombée d'origine terrestre, on ne peut pas en conclure non plus à l'origine cosmique de ces retombées, et cette méthode d'évaluation manque de critère d'association de ces retombées avec un autre phénomène d'origine cosmique certaine. Les corrélations avec les averses de météores ne sont pas nettes, les variations de station à station et les variations annuelles restent difficilement compréhensibles. Par conséquent, pour déterminer les quantités de poussières cosmiques, seules probablement les méthodes de collection dans la stratosphère devront être développées dans l'avenir.

La valeur de masse accrétée obtenue par ces méthodes reste cependant raisonnable malgré une fiabilité réduite, car on retombe sur les mêmes ordres de grandeur que lorsqu'on extrapole les évaluations faites dans l'espace avec les microphones ou bien lorsqu'on utilise les collections de particules submicroniques dans la haute atmosphère.

Si les observations stratosphériques pouvaient être développées, la détermination du rapport masse/radioactivité dans la haute stratosphère parallèlement à la détermination des retombées radioactives au sol donnerait probablement la meilleure méthode de détermination des masses accrétées. En effet, au sol, les retombées radioactives peuvent être déterminées sans aucune ambiguïté, dans l'espace, dans la haute stratosphère, les rapports radioactivité/masse pourront être établis avec une assez bonne précision même à partir d'échantillons peu volumineux.

En conclusion, si nous nous intéressons à la matière de toute forme et de toute composition, c'est très certainement le chiffre de $5,1.10^8$ tonnes/Terre-an obtenu en utilisant conjointement la méthode de mesure de la retombée radioactive au sol et la détermination du rapport masse/radioactivité qui doit être préféré.

C - Les méthodes chimiques

La confrontation des méthodes chimiques avec l'ensemble des autres méthodes présente un grand intérêt car cette confrontation, tout comme l'existence des sphérules, nous fait entrevoir le problème de l'origine de la poussière cosmique.

Les différentes déterminations expérimentales de nickel et de cobalt se recoupent très bien. L'interprétation que nous proposons des surplus de ces éléments reste cependant entachée d'erreurs en raison d'une donnée que nous n'avons pu discuter dans ce travail qui est l'évaluation de la quantité globale de sédiments déposés dans la mer, il y a cependant peu de possibilités autres qu'un apport cosmique pour expliquer la forte teneur des sédiments en ces éléments.

La méthode des évaporations globales de neige est certainement une très bonne méthode en raison même de sa simplicité. Il serait intéressant de l'appliquer à l'étude d'échantillons de grand volume, ce qui permettrait en outre, l'étude chimique des résidus ainsi obtenus. Notre étude n'a porté que sur une carotte de glace et ne présente donc pas pour l'instant une valeur quantitative réelle.

Par conséquent, actuellement, les informations les plus valables que l'on ait sont celles fondées sur les analyses de cobalt et de nickel. Les évaluations que l'on a pu faire à partir de ces analyses s'inscrivent dans les mêmes ordres de grandeur que celles obtenues dans les meilleures méthodes de filtration, c'est-à-dire dans la fin de la gamme des 10^7 et le début de la gamme des 10^8 .

On n'a pas constaté, pour cette matière finement divisée, de corrélation nette avec d'autres phénomènes de l'espace, et avant de conclure sur la possibilité de son origine cosmique on doit se poser la question de savoir d'une part quelles pourraient être les corrélations avec d'autres phénomènes de l'espace, et d'autre part si l'on peut avoir des sources de poussière cosmique aussi importantes.

On peut penser, en ce qui concerne les corrélations avec d'autres phénomènes de l'espace qu'on devrait pouvoir détecter des anomalies ioniques dans la haute atmosphère en relation avec les phénomènes cosmiques tout comme on peut par exemple détecter les nuages noctiluscents. Les expériences sur les ions sodium, potassium et lithium dans la haute atmosphère mettent bien en évidence des anomalies, mais aucune conclusion les rattachant au cosmos n'a été publiée. Par ailleurs, on a déjà détecté la présence de matière submicronique en liaison avec les perturbations solaires. Notamment, CLARK (1970) a mis en évidence une corrélation différée entre la réflexion de lumière à 70 km et les éruptions solaires. Cette matière très divisée peut, par ailleurs, être rattachée directement à des arrivées extérieures. En effet, nous savons que dans les couches froides de l'atmosphère, les ions des éléments solides n'ont aucune raison de rester à l'état gazeux et doivent se coaguler en particules submicroniques. Cette corrélation avec le Soleil permet d'émettre l'hypothèse que la quantité de matière en provenance du Soleil est peut-être plus importante qu'on ne le pense.

Nous avons vu que l'énergie interceptée à partir du vent solaire et nécessaire pour rendre compte des aurores boréales est équivalente à 10^{18} ergs. Cette énergie équivaldrait à une interception du vent solaire par une section de l'ordre de 10^{18} cm², c'est-à-dire environ 80 fois la section géométrique de la Terre. Si nous considérons que les électrons porteurs de cette énergie sont effectivement déviés et précipités sur la Terre, si d'autre part, comme nous le savons, aucune augmentation du flux protonique n'existe à la limite de la magnétosphère, il est normal de supposer que les protons et les autres composantes du vent solaire sont également précipités sur la Terre. La masse totale de ces particules doit correspondre à $5,4 \cdot 10^5$ tonnes de matière, mais celle-ci est composée à 99 % d'hydrogène. Les mécanismes permettant de reperdre cet hydrogène dans la haute atmosphère sont nombreux et cet apport ne laisserait donc que $5,4 \cdot 10^3$ tonnes d'éléments solides.

Si l'arrivée d'éléments lourds en provenance du Soleil se limite à cette composante de quelques électrons volts, soit 10^3 tonnes, il n'est pas possible d'expliquer les corrélations de CLARK entre la diffusion due à la poussière dans la haute atmosphère et l'activité solaire, d'ailleurs, CLARK lui-même, évalue cette quantité de poussière à 10^7 à 10^8 tonnes par an. Il serait donc nécessaire de faire

intervenir une composante lourde du vent solaire. Les mesures faites sur la Lune pour déterminer les rapports des différents éléments seront certainement d'un grand secours, mais les mesures directes manquent actuellement.

III - CONCLUSIONS

La première remarque qui s'impose lorsqu'on examine les résultats obtenus dans ce travail, est que une même équipe, travaillant avec les mêmes hypothèses de départ obtient des résultats extrêmement différents selon les méthodes qu'elle emploie.

En fait, on est obligé de constater que, dans aucun cas, l'ensemble qui est défini par la méthode de mesure employée, ne recouvre la totalité de l'ensemble à mesurer. Ainsi, la grande dispersion des résultats est finalement due au processus qui a été employé : nous ignorons ce qu'est la poussière cosmique et nous cherchons à la mesurer. Comment peut-on prétendre mesurer un objet sans le connaître ? Lorsque nous imaginons une caractéristique qui devrait être un critère de cosmicité, nous ne faisons que mesurer l'ensemble que nous avons défini, mais nous nous écartons sensiblement de l'ensemble qui devrait être mesuré, alors que si nous connaissions ce dernier nous pourrions construire autant de méthodes d'approche qu'il y a de caractéristiques et vérifier une mesure par une autre, et nous serions alors en droit de demander un recoupement exact, ainsi, au lieu de mesurer une série de caractéristiques d'identification dont chacune devrait être un critère de cosmicité, nous sommes réduits à définir la poussière cosmique comme un recoupement de mesures, une intersection d'ensembles définis chacun par une méthode de mesure. Il est donc parfaitement normal que ces ensembles recouvrent des quantités totalement différentes, trop grandes ou trop petites, mais il n'y a aucune raison pour qu'une d'entre elles recouvre exactement l'ensemble des caractéristiques de la poussière cosmique et des éléments plus fins de matière qui peuvent nous parvenir du cosmos en des quantités non négligeables.

On pourrait donc considérer comme une faute de logique le fait de s'être fixé comme objectif l'évaluation d'une quantité alors que l'objet à évaluer était inconnu. Ce reproche ne serait cependant pas justifié car, même si l'on avait voulu suivre dans une première étape une autre voie, une démarche inverse, on aurait été réduit, en fait, à faire pratiquement la même chose. En effet, l'ignorance des caractéristiques de la poussière nous aurait obligé à étudier les caractéristiques qui pourraient être associées à un certain type de poussières, mais, à moins d'être primaires, nous n'avons aucune raison d'introduire d'hypothèses limitatives, dont nous aurions dû, une fois les caractéristiques dénombrées, élargir l'évaluation à un deuxième ensemble, or nous ne sommes plus sûrs que le deuxième ensemble recouvre aussi bien l'objet recherché. Par exemple, nous avons toutes raisons de croire que les sphérules sont d'origine cosmique, une fois des échantillons de cet ensemble réunis, nous aurions effectué leur analyse et nous aurions vu qu'effectivement les teneurs en nickel et cobalt, sans être celles des météorites, ne sont pas non plus celles de la croûte terrestre. Dès lors, les rapports anormaux de ces deux éléments nous auraient amenés, justement pour ne pas nous limiter au premier ensemble défini par la forme sphérique à rechercher les limites des deuxième et troisième ensembles définis par les teneurs anormales de nickel et de cobalt, et ce faisant, nous nous trouvons avec un écart de 10^4 entre ces trois estimations.

Il ne faut cependant pas arriver à des conclusions trop pessimistes, mais une chose semble certaine : il est indispensable, quand nous introduisons un ensemble défini par une méthode de mesure, de conduire des études de tous les aspects de cette caractéristique. L'anomalie de nickel n'est plus suffisante, il est indispensable d'étudier en détail tous les domaines que peut recouvrir cette anomalie, non pas comme cela est souvent fait en proposant quelque mécanisme plus ou moins bien décrit par quelque mot nouveau, mais en mesurant réellement l'ensemble des champs touchés par cette caractéristique.

La matière cosmique, puisqu'elle apparaît si invisible et si fugace ne sera définie finalement que par ce qui ne pourra pas être compris dans des ensembles terrestres, les mécanismes régissant ceux-ci n'étant pas inventés mais réellement trouvés, étudiés, décrits et mesurés.

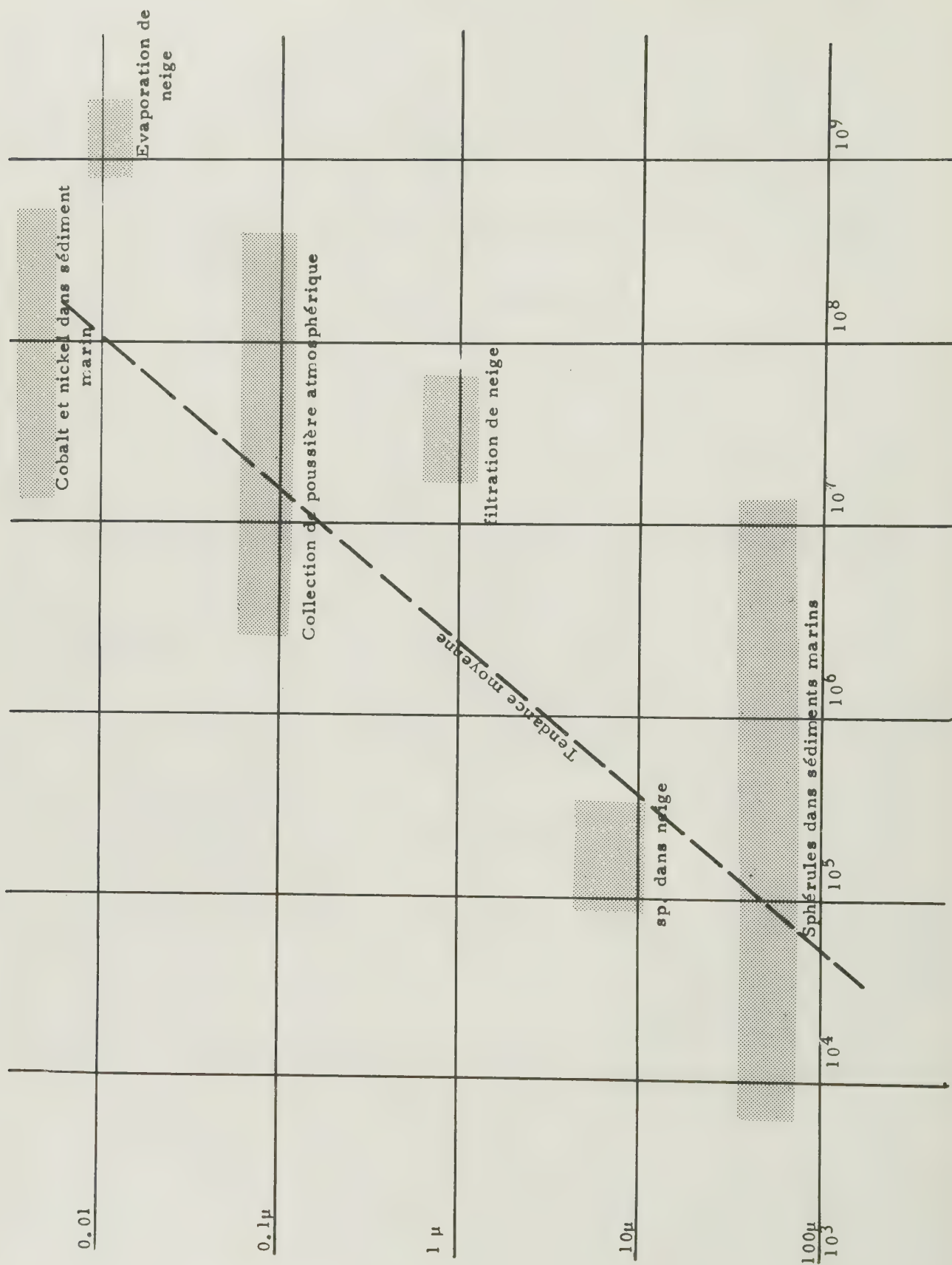
Nous voyons donc au terme de ce travail un tableau certainement inhabituel : un expérimentateur choisit généralement une méthode de mesure, à l'intérieur de celle-ci il arrive à des conclusions, à des grandeurs. Il n'a pas été possible dans notre cas de suivre la même attitude, ou plutôt, tant que une ou deux méthodes seulement avaient été employées nous avons suivi le sort de tous les expérimentateurs et nous nous sommes attachés à une évaluation, mais, au fur et à mesure que d'autres méthodes apparaissaient finalement tout aussi valables, on est amené à l'idée d'un champ de résultats où la quantité dépend de la taille.

La granulométrie suggérée par ce tableau n'est certainement pas incompatible avec les courbes d'abondances poids que nous connaissons par les autres méthodes, la statistique radar ou les comptages effectués dans l'espace, mais point essentiel, cette courbe se prolonge vers les petites dimensions submicroniques. Et alors que dans la taille des dizaines de microns nos résultats recoupent la majorité des résultats obtenus par d'autres auteurs (voir article bibliographique, GRJEBINE, 1965) dans les très petites dimensions il est plus difficile de parler d'accord parce que sauf un ou deux expérimentateurs (ZAHAROV et MANSA, M. PETTERSON (filtrage d'air sur le Kilauwa) ou d'observations de "nanométéorites", HEMENWAY) les résultats sont trop fragmentaires pour parler réellement d'accord.

C'est probablement dans ces domaines de poussières de très faibles dimensions que l'effort de recherche devrait être dirigé dans le futur.

Tableau 26

P	Lieu de prélèvement	Méthode et hypothèse	g/m ² .jour	g/m ² .an	en tonne pour la Terre/an
22	mesure des retombées au sol avec étalonnage des poussières collectées dans la stratosphère	1° méthode (hypothèse 1 (hypothèse 2			(1,6.10 ⁸ (8,0.10 ⁸
54		2° méthode (hypothèse 1 (hypothèse 2			(6,4.10 ⁷ (3,2.10 ⁸
et					
79		3° méthode (hypothèse 1 (hypothèse 2			(1,02.10 ⁸ (5,1.10 ⁸
80		4° méthode (hypothèse 1 (hypothèse 2			(3,4.10 ⁶ (1,7.10 ⁷
	collection stratosphérique	5° méthode vitesse de chute			1,0.10 ⁷
97	neige antarctique	évaporation globale 14,1 mg/kilo de neige	5,8.10 ⁻⁷	2,1	1,0.10 ⁹
109		filtration globale 0,53 mg/kilo de neige	2,1.10 ⁻⁶	7,8	3,7.10 ⁷
123		comptage des sphérules taille moyenne 7 µ	7,7.10 ⁻¹¹	2,45.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁵
135	sédiments marins	comptage de sphérules taille moyenne 15 µ			
	V 18-20 Océan Indien	-	4,7.10 ⁻¹²	1,7.10 ⁻⁵	8,5.10 ³
	C 13 Mer Méditerranée	-	7,4.10 ⁻¹¹	2,7.10 ⁻⁴	1,3.10 ⁵
	C 14 " "	-	1,1.10 ⁻¹⁰	4,0.10 ⁻⁴	2,0.10 ⁵
	C 24 " "	-	6,25.10 ⁻¹⁰	2,28.10 ⁻³	1,1.10 ⁶
139	Lac Léman		9,6.10 ⁻⁹	3,5.10 ⁻²	1,7.10 ⁷
151	Lac de Nantua		6,3.10 ⁻¹⁰	2,3.10 ⁻³	1,1.10 ⁶
122-	Nickel modèle sphérules				8 .10 ⁷
-125	Cobalt modèle sphérules				8,2.10 ⁷



BIBLIOGRAPHIE

ALLER L.H. (1961)

dans "The abundance of the elements", Interscience Publishers, New York.

AMIN B.S., KHARKAR D.P., LAL D. (1966)

Cosmogenic Be^{10} and Al^{26} in marine sediments

Deep Sea Res., Vol. 13, p. 805-824.

ASSAD A.S. (1967)

Effect of the solar activity on the brightness and polarization of the zodiacal light

Nature Vol. 214, p. 259-261.

AUER S., GRUN E., RAUSER P., RUDOLPH V., SITTE K. (1968)

Studies on simulated micrometeoroids impact

dans "Space Research" VIII, Ed. North Holland, Amsterdam, p. 606-616.

AUER S., SITTE K. (1968)

Technical detection for micrometeoroids using impact ionization

Earth and Planetary Sc. Letters, Vol. 4, p. 175-183.

AVY P. (1956)

Dans "Les aérosols", Dunod Paris.

BAKER J.L., ANDERS J.E. (1968)

Accretion rate of cosmic matter from iridium and osmium contents of deep sea sediments

Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 32, p. 627-645.

BLACKWELL D.E., INGHAM M.F. (1961)

Monthly notices Roy. Astronom. Soc., Vol. 122, p. 113-156.

BIOT (1960)

Cité dans "Principles of Meteoritics" de E.L. Krinov, Pergamon Press 1960, p. 13.

BONNER F., LAURENCO A.S. (1965)

Nickel content of Pacific Ocean cores

Nature, Vol. 207, p. 933-935.

BOWEN H.J.M., GIBBONS D. (1963)

Dans "Radioactive analysis", Clarendon Press.

BOWEN E.G. (1953)

The influence of meteoritic dust on rainfall

Australian J. of Physics, Vol. 6, p. 490-497.

BRUUN A.F., LANGER E., PAULY H. (1955)

Magnetic particles found by raking the deep sea bottom

Deep Sea Res., Vol. 2, p. 230-246.

BROWN H. (1953)

"A bibliography of meteorites".

CAMERON A.G. (1968)

A new table of abundances of the elements in the solar system

Dans "Origin and distribution of elements", Ed. L.H. Ahrens, Pergamon Press,
p. 125-146.

CARRARA N., CIONINI A., RONCHI L., GRJEBINE T. (1966)

Influence of meteoric dust on the VLF propagation

Rep. Centra di studio per la Fisica delle Microonde Firenze, CM-R41-1.8.

CARRARA N., CIONINI A., RONCHI L., GRJEBINE T. (1968)

Possible influence of meteoric dust on VLF signal propagation

II Nuovo Cimento, Vol. 53, p. 222-225.

CAYEUX A., ANDIEUX M. (1962)

Grain éolisé dans les grès ératiques de Terre Adélie

C.R. Soc. Géol. de France.

CLARK D.D. (1970)

Measurements of light scattering and polarization between 20 and 80 km

dans "Space Research" X, p. 305-313.

CONWAY E.J. (1943)

The chemical evolution of the ocean

Proc. Roy. Irish Acad., 48B, p. 161-212.

CROZIER W.D. (1962)

Five years of continuous collection of black magnetic spherules from the atmosphere

J. Geophys. Res., Vol. 67, p. 2543-2548.

CROZIER W.D. (1966)

Nine years of continuous collection of black magnetic spherules from the atmosphere

J. Geophys. Res., Vol. 71, p. 603-611.

CROZIER W.D. (1960)

Black, magnetic spherules in sediments
J. Geophys. Research, 65, p. 2971-2977.

CROZIER W.D. (1961)

Micrometeorite measurements : satellite and ground level data compared,
J. Geophys. Research, Vol. 66, p. 2793-2795.

DAVIDSON W. (1967)

Dans "Encyclopedia of atmospheric sciences and astrogeology"
R.W. Fairbridge (Reinhold Pub. Co.) p. 272.

DELUC J.A. (1960)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press 1960.

ELLYETT C.D., KEAY C.S.L. (1964)

Meteors : an unexpected increase in 1963
Science, Vol. 146, p. 1548.

ESHLEMAN V.R., GALLAGHER P.B. (1962)

Radar studies of 15th magnitude meteors
Astronomical J., Vol. 67, p. 245-248.

FECHTIG H., UTECH K. (1964)

On the presence or absence of nickel in dark magnetic cosmic spherules and their
mechanics of origin
Annals New York Acad. Sc., Vol. 119, p. 243-249.

FIOCCO G. (1965)

Optical radar results and ionospheric sporadic E.
J. Geophys. Res., Vol. 70, p. 2213-2215.

FIOCCO G. (1966)

A note on the influx of extraterrestrial dust as an energy source in the E. region
Radio Science, Vol. 1, new series (2), p. 252.

FRANKLIN F.A., HODGE P.W., WRIGHT F.W. (1967)

Determination of the densities of individual meteoritic, glacial and volcanic
spherules
J. Geophys. Res., Vol. 72, p. 2543-2546.

FREDRIKSSON K., MARTIN L.R. (1963)

The origin of black spherules found in Pacific islands, deep sea sediments and
Antarctic ice
Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 27, p. 245-248.

GERARD V.B. (1966)

Anomalous variations of GBR as received in New Zealand
J. Atmosph. Terr. Phys. Vol. 28 (4), p. 425-428.

GLASS B., HEEZEN E.C. (1967)

Tektites and geomagnetic reversals, microtektites in deep sea sediments
Nature 214, p. 372-374.

GOLDBERG E.D., KOIDE M. (1962)

Geochronological studies of deep sea sediments by the ionium/thorium method
Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 26, p. 217-450.

GRJEBINE T. (1963)

Accumulation de poussières cosmiques sur la terre
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 256, p. 3735-3738.

GRJEBINE T. (1964)

A study of cosmic dust distribution
Annals of the New York Acad. of Sc., Vol. 119, Art. 1, p. 126-142.

GRJEBINE T., LALOU C., ROS J. (1964)

Study of magnetic spherul in 3 cores of the occidental bassin of the Mediterranean sea
Annals of the New York Acad. Sc. Vol. 119, Art. 1, p. 143-165.

GRJEBINE T. (1965)

Les sphérules magnétiques dans les sédiments de la Méditerranée
Bull. Inst. Océanogr. Monaco, Vol. 65, n° 1338.

GRJEBINE T. (1965)

Abundance of cosmic dust
dans "Mantles of the Earth and Terrestrial Planets"
Interscience Publ., John Wiley and Sons.

GRJEBINE T., LAMBERT G. (1965)

Rôle de la stratosphère dans le problème des fines poussières cosmiques.
Colloque Franco-Belge sur les problèmes météorologiques de la stratosphère et de la mesosphère (Paris 1965).

GRJEBINE T., LAMBERT G., LABEYRIE J. (1966)

Sur l'origine cosmique des maximums saisonniers de retombées magnétiques
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 262, p. 1578-1581.

GRJEBINE T., HOANG CHI TRACH (1967)

Accroissement de poussières cosmiques dans la stratosphère après une averse de météores
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 264, p. 1427-1430.

GRJEBINE T., YOKOYAMA Y., BRISTEAU P. (1970)

Special pattern of the abundance ratio of elements in spherules
C.O.S.P.A.R. (Léningrad 1970), à paraître dans "Space Research"
Ed. North Holland, Amsterdam.

GRENET G. (1930)

Thèse soutenue à Paris (Annales de Physique).

INGHAM M.F. (1963)

Month. notes Roy. Astronomical Soc.

MASSALISKAIA K.P., KHLADNY E.F. (1954)

Meteoritika XI, p. 33-46.

KOMABAYASI (1962)

Enrichment of inorganic ions with increasing atomic weight in aerosols, rainwater
and snow in comparison with sea water

J. Meteo. Soc. Japan, Vol. 40, p.1.

JEHANNO C., LABEYRIE J. (1959)

J. Phys. Radium, Vol. 20, p. 7.

KRINOV E.L.

Dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press, 1960.

HODGE P.W., WRIGHT F.W. (1964)

Studies of particles of extraterrestrial origin. 2 - A comparison of microscopic
spherules of meteoritic and volcanic origin.

J. Geophys. Res., Vol. 69, p. 2449-2454.

HODGE P.W., WRIGHT F.W., LANGWAY C.C. Jr (1964)

Studies of particles of extraterrestrial origin. 3 - Analyses of dust particles
from polar ice deposits

J. Geophys. Res. p. 2919-2931.

HORN M.K., ADAMS J.A.S. (1966)

Computer derived geochemical balances and element abundances

Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 30, p. 279-297.

HOWARD (1802)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics" Pergamon Press 1960, p. 13.

LAL D., VENKATAVARADAN V.S. (1967)

Activation of cosmic dust by cosmic ray particles

Earth and Planetary Sci. Letters, Vol. 3, p. 299-310.

LAMBERT G. (1963)

Etude du comportement des aérosols radioactifs artificiels. Applications à quelques problèmes de circulation atmosphérique
Thèse soutenue à Paris.

LANGWAY C.C., MARVIN U.B. (1964)

Some characteristics of black spherules
Annals of the New York Acad. of Sci. Vol. 119, p. 205-223.

LAVOISIER (1772)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics" Pergamon Press 1960, p. 9.

LINDBLAD B.A. (1968)

Long term variations in meteor radar rates, meteor heights and radarecho amplitudes
Dans "Physics and dynamics of meteors" Ed. L. Kresak et P. Millman, Reidel Publ. Co.

LINDBLAD B.A., ARINDER G., WIESEL T. (1970)

Rocket observations of micrometeorites
Space Res. Vol. X, p. 295-304.

LINK F. (1964)

Sur la couche absorbante élevée de la terre
dans "space Research" IV, Ed. North Holland Co. Amsterdam, p. 189.

LORIUS C. et al. (1968)

Dating of firn layers in Antarctica
International Symposium on Antarctic Glaciological Exploration, USA
3-7 septembre 1968 (I.A.S.H., Publication n° 86, Cambridge).

LOVITS (1804)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press 1960, p. 14.

LOWELL ; A.C.B. (1959)

Geophysical aspects of Meteors
Encyclopedia of Physics, Ed. S. Flügge, p. 427-454.

Mac INTOSH, MILLMAN P.M., (1964)

Radar meteor counts : anomalous increase during 1963
Science, Vol. 166, p. 1457-1458.

MARSCHALL E.D. (1962)

The stratigraphic distribution of particulate matter in the firn at Byrd station, Antarctica
Antarctic Res. Geophys. Monogr. n° 7, p. 185-196.

MASON B. (1962-1963)

The carbonaceous chondrites

Space Science Reviews, Vol. 1, p. 621-646.

MEUNIER S., TISSANDIER G. (1878)

Présence de sphérules magnétiques semblables à celles de la poussière atmosphérique dans les roches géologiques anciennes

C.R. Acad. Sc. Paris, Vol. 86, p. 450.

MEUNIER S. (1903)

Chute de poussières récemment observée en Islande

C.R. Acad. Sc. Paris, Vol. 136, p. 1713.

MERRIHUE C.M. (1963)

rare gases from cosmic dust in Pacific red clay

New York Acad. Sc. (conférence on Cosmic Dust, Novembre 21-22, 1963).

MILLARD H.T., BROWN H.

Meteorite time of fall patterns

CALTEC, Pasadena, California.

MILLMAN P.M., Mac INTOSH (1964)

Meteor Radar Statistics I

Canadian J. of Phys., Vol. 42, p. 1730-1742.

MORELLI J. (1968)

Contribution à l'étude de la composition des aérosols formés à la surface de la mer : leur rôle dans les échanges de matières entre l'Océan, l'atmosphère et le continent.

Thèse de 3ème cycle soutenue à Paris.

MULLER E.A. (1968)

The solar abundances

dans "Origin and distribution of the elements" Ed. L.H. Ahrens, Pergamon Press, p. 155-176.

MUTCH T.A. (1963-1964)

Extraterrestrial particles in paleozoic salts

Annals of the New York Acad. of Sci., Vol. 119, p. 166-185.

MURRAY J. (1876)

Roy. Soc. of Edinburg - Proceedings n° 9.

MURRAY J., RENARD A.F. (1883)

On the microscopic characters of volcanic ashes and cosmic dust and their distribution in the deep sea deposits

Roy. Soc. of Edinburgh - Proceedings n° 12, p. 474.

MRKOS A. (1962)

Détermination du dépôt de poussières cosmiques à la surface de l'Antarctique oriental

Bull. de l'expédition Antarctique Soviétique n° 32.

NEZAMI M. et al. (1964)

Mesure des taux d'accumulation de la neige au bord du continent antarctique par la méthode du Pb-210

C.R. Acad. Sc. Paris, Vol. 259, p. 3319-3322.

NGUYEN BA CUONG, LAMBERT (1967)

Rôle du relief dans le taux de retombées radioactives

dans "Géochimie, précipitations, évaporation, humidité du sol, hydrométrie"

Assemblée Générale de Berne, Septembre-octobre 1967, p. 203-214.

NORDENSKJOLD N.A.E. (1874)

Philosophical Mag. Vol. 4, n° 48, p. 546.

NORDENSKJOLD (1883)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press 1960, p. 165.

OESCHGER H., AEGERTER S., RENAUD A., SCHUMACHER E. (1967)

Tritium variations in greenland ice and their geophysical implications

dans "Studies based on the tritium content of the ice samples

E.G.I.G., Report n° 4, Vol. 5.

OORT J.H. (1963)

Empirical data on the origin of comets

dans "Moon, meteorites and comets" Ed. P. Kuiper, chapitre 20, p. 665-674

The University of Chicago Press.

OPICK J. (1958)

Statistical results from the Arizona expedition for the study of meteors

Contr. Armagh Obs. n° 26, p. 1-82.

PARK F.R., REID A.M. (1964)

A comparative study of some metallic spherules

Annals of the New York Acad. of Sc., Vol. 119, p. 250-281.

PARKIN D.W., HUNTER W. (1962)

Adv. Astron. Astrophys., Vol. 1, p. 106.

PETTERSON H. (1947)

Reports on the Swedish deep sea expedition 1947-1948, Goteborg-Elanders

Boktryckeri Aktiebolag.

PETTERSON H., ROTSCHI H. (1950)

Nickel content of deep sea deposits
Nature, Vol. 166, p. 308.

PETTERSON H. (1951)

Cahier du Centre d'Etudes et de Recherches de Biologie et d'Océanographie Médicale
(CREO), n° 4, p. 1-21.

PETTERSON H., ROTSCHI H. (1952)

Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 2.

PICCIOTTO E., WILGAIN S.E. (1963)

Fission products in Antarctic snow : a reference level for measuring accumulation
J. Geophys. Res. Vol. 68, p. 5965-5972.

RASOOL S.I. (1967)

dans "The encyclopedia of atmospheric sciences and astroleology,
Ed. R.W. Fairbridge, Reinhold Pub. Co., p. 730.

REAY N.K., RING J. (1968)

Radial velocity measurements on the zodiacal light spectrum
Nature, Vol. 219, p. 710-713.

ROSEN J.M. (1964)

J. Geophys. Res., Vol. 69, p. 4673-4676.

RUDEAUX (1927)

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press 1960,
p. 165-166.

SCHAEFFER O.A. (1965)

Communication au "Meteor and Cosmic Dust Symposium" Cambridge S.A.O.

SCHAEFFER O.A., MEGRUE G., THOMPSON S.O. (1963)

Experiments to test the presence of cosmogenic nuclides in ocean sediments.
New York Acad. Sci. (conference on Cosmic Dust, Nov. 21-22) BNL 7881.

SCHMIDT R.A. (1963)

Microscopic extraterrestrial particles from Antarctic peninsula
Annals of the New York Acad. Sci. , Vol. 119, p. 186-204.

SCHMIDT R.A. (1963)

Geophysical and polar research center university of Wisconsin, Res. Report Ser.
63-3, p. 65.

SCHMIDT R.A., COHEN T.J. (1964)

Variation of particle accretion rates with latitude
Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 45, p. 87.

SCHMIDT R.A., VENKATARAVAN K.V., JACKSON M.L., WOOLLARD G.P. (1963)

Surface features of metallic spherules
Science, Vol. 142, p. 581-582.

SITTE (De) (1967)

Micrometeorite studies at the Max Plack Institut für Kernphysik Heidelberg
(an interim report)
E.S.R.O., 18 avril.

SHIMA MAKoto (1968)

Cosmic dust Vol. 5, n° 2, p. 1088-1099
J. Soc. d'Etude Technologie des Poudres.

STOIKOVICH

Cité par E.L. Krinov dans "Principles of Meteoritics", Pergamon Press, 1960, p. 14.

TAYLOR L.D., GLIOZZI J. (1964)

Distribution of particulate matter in a firn core from eight stations of Antarctica
Antarctic Snow and Ice Studies - Antarctic Res. Vol. 2, p. 267-277.

TISSANDIER G. (1875)

C.R. Acad. Sc. Vol. 81, p. 576.

TUREKIAN K.K., IMBRIE J. (1966)

The distribution of trace elements in deep sea sediments of the Atlantic ocean
Earth and Planetary Sc. Letters, Vol. 1, p. 161-168.

TUREKIAN K.K. (1968)

Deep sea deposition of barium, cobalt and silver
Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 32, p. 603-612.

WISEMAN D.H. (1964)

Rates of sedimentation of nickel, cobalt, copper and iron on the equatorial and
atlantic floor and its bearing on the nature of cosmic dust.
Nature, Vol. 202, p. 1286-1288.

WRIGHT F.W., HODGE P.W., LANGWAY C.C. Jr (1963)

Studies of particles for extraterrestrial origin. 1 - Chemical analysis of 118
particles
J. Geophys. Res., Vol. 68, p. 5575-5587.

WRIGHT F.W., HODGE P.W. (1965)

Studies of particles for extraterrestrial origin. 4-Microscopic spherules from recent volcanic eruptions

J. Geophys. Res., Vol. 70, p. 3889-3898.

WRIGHT F.W., HODGE P.W., CAKES A., LACOUNT R., TISHLER S. (1965)

The volcanic dust sampling program of the smithsonian astrophysical observing stations

Smithsonian Institution, Astrophys. Observatory, special report in space Science, number 172, Cambridge Press.

YOKOYAMA Y. (1966)

Relation entre les retombées radioactives et les précipitations

C.R. Acad. Sc., Vol. 262, p. 1409-1413.

YOKOYAMA Y., TOBAILEM J., GRJEBINE T., LABEYRIE J. (1968)

Détermination de la vitesse de sédimentation océanique par une méthode non destructive de spectrométrie gamma

Geochim. et Cosmochin. Acta, Vol. 32, p. 347-352.

ZAHAROV I. (1962)

Collection of meteoric dust particles in Onrejov

Proceedings of the 1st National conference on Aerosols. Liblice Octobre 196

Czechoslovak Academy of Sciences, 1964.

Manuscrit reçu le 23 mars 1972

